CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

INDÚSTRIA 4.0 COMO PROPULSORA DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL, RUMO A AGENDA 2030.

Aline Xavier dos Santos Germano

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Sistemas Produtivos, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Cefet/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento Regional e Sistemas Produtivos.

Orientador: Wladmir Henriques Motta
Coorientadora: Amanda Fernandes Xavier Pedrosa

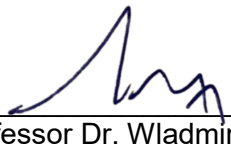
Rio de Janeiro
Janeiro/2023

INDÚSTRIA 4.0 COMO PROPULSORA DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL RUMO À AGENDA 2030.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Sistemas Produtivos do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Cefet/RJ como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento Regional e Sistemas Produtivos.

ALINE XAVIER DOS SANTOS GERMANO

Banca Examinadora:



Presidente, Professor Dr. Wladmir Henriques Motta (CEFET/RJ)

Professora Dra. Amanda Fernandes Xavier Pedrosa (PEP/COPPE/UFRJ)

Professor Dr. José André Villas Boas Mello (CEFET RJ)

Professora Dra. Ursula Gomes Rosa Maruyama (CEFET/RJ)

Rio de Janeiro
Janeiro/2023

DEDICATÓRIA

Dedico esta pesquisa ao meu filho Miguel, para quem eu quero e devo ser exemplo.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus, por colocar em meu caminho pessoas e experiências que fizeram de mim uma mulher forte, capaz de resistir a todas as adversidades que poderiam me impedir de chegar até aqui.

Agradeço a minha família, em especial aos meus pais que sempre tiveram e suas filhas como prioridade, que trabalharam dia após dia para garantir que minha caminhada fosse mais leve, mais segura e pudesse me levar aonde eu quiser chegar. Ao meu esposo Leonardo Germano, por me apoiar e me fazer acreditar sempre que “Tudo dará certo!”, por tentar me acalmar, mesmo que essa tarefa beire o impossível. Ao meu filho Miguel, por ser a minha dose diária de força, um dos motivos mais fortes para não desistir de nada, por trazer luz para todos os momentos de escuridão.

Finalmente, agradeço a todos aqueles que de alguma forma me incentivaram a concluir esta dissertação, aos que colaboraram respondendo a pesquisa e aos que me guiaram durante a elaboração.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

Cefet/RJ - Sistema de Bibliotecas – UnED Nova Iguaçu

G373 Germano, Aline Xavier dos Santos.

Indústria 4.0 como propulsora da sustentabilidade ambiental, rumo a agenda 2030 / Aline Xavier dos Santos Germano. – 2023.

96 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2023.

Bibliografia: f. 77-82.

Orientadores: Wladmir Henriques Motta. [e] Amanda Fernandes Xavier Pedrosa.

1. Planejamento regional. 2. Indústria 4.0 – Brasil. 3. Sustentabilidade ambiental 4. Economia circular. 5. Objetivos do desenvolvimento sustentável. I. Motta, Wladmir Henriques (orient.). II. Pedrosa, Amanda Fernandes Xavier (orient.). III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por: Samantha Andrade da Rosa – CRB7-5930

RESUMO

Há uma preocupação global tanto das empresas quanto dos consumidores, em que cada vez mais se realize uma gestão nas indústrias que priorize além do equilíbrio econômico e do bem-estar social, o uso responsável dos recursos naturais, o que naturalmente acarreta a necessidade da evolução das cadeias produtivas. Para o alcance de uma produção mais sustentável, novas abordagens se fazem necessárias. Esta dissertação aborda as oportunidades associadas a sustentabilidade ambiental que podem ser trazidas pela indústria 4.0. O objetivo é, identificar estas oportunidades através das experiências das empresas que já passaram pela implantação das tecnologias 4.0 no Brasil e explorar como elas podem impulsionar o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, para o cumprimento das metas da Agenda 2030. Para o alcance de tais objetivos, foram utilizados como métodos, uma revisão sistemática de literatura, visando o levantamento dos impactos ambientais esperados pela literatura existente e uma pesquisa de campo para identificar os resultados reais decorrentes da implantação. As evidências empíricas obtidas, revelam que as empresas que passaram pela implantação no Brasil, alcançaram os resultados esperados pela literatura, confirmando a contribuição das tecnologias 4.0 para o alcance de benefícios ambientais que contribuem para o alcance dos ODS. Os resultados obtidos ainda deram origem a um framework, que serve como ferramenta de apoio para os possíveis interessados em adotar o conceito de indústria 4.0 visando a sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Sustentabilidade Ambiental; Brasil; ODS.

ABSTRACT

There is a global concern, both from companies and consumers, that more and more management is being carried out in industries that prioritize, in addition to economic balance and social well-being, the responsible use of natural resources, which naturally entails the need for evolution. of production chains. To achieve more sustainable production, new approaches are needed. This dissertation addresses the opportunities associated with environmental sustainability that can be brought by industry 4.0. The objective is to identify these opportunities through the experiences of companies that have already gone through the implementation of 4.0 technologies in Brazil and explore how they can boost the achievement of the UN Sustainable Development Goals, for the fulfillment of the goals of the 2030 Agenda. Based on such objectives, a systematic literature review was used as methods, aiming to survey the expected environmental impacts by the existing literature and a field research to identify the actual results arising from the implementation. The empirical evidence obtained reveals that the companies that underwent implementation in Brazil achieved the results expected by the literature, confirming the contribution of 4.0 technologies to the achievement of environmental benefits that contribute to the achievement of the SDGs. The results obtained also gave rise to a framework, which serves as a support tool for those possibly interested in adopting the concept of industry 4.0 aimed at environmental sustainability.

Keywords: Industry 4.0; Environmental Sustainability; Brazil; ODS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução das revoluções industriais……17
Figura 2 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....26
Figura 3 - Representação do modelo de Economia Linear.....29
Figura 4 - Adaptação do diagrama de borboleta Ellen MacArthur Foundation ……30
Figura 5 - Adaptação do framework RESOLVE Ellen MacArthur Foundation…….32
Figura 6 - Participação da Indústria no PIB brasileiro.....36
Figura 7 - PIB da Indústria de transformação ……36
Figura 8 - Participação da Indústria de transformação do PIB……...37
Figura 9 - Participação dos setores industriais no PIB…….37
Figura 10 - Participação dos setores industriais no PIB da indústria de transformação.38
Figura 11 - Fluxograma de planejamento da pesquisa ……41
Figura 12 - Fluxograma do processo de seleção dos estudos.....47
Figura 13 - Impactos ambientais identificados na literatura.....52
Figura 14 - Setor Industrial das empresas participantes.....53
Figura 15 - Distribuição (%) das empresas por período de implantação.....54
Figura 16 - Motivação para implantação das novas tecnologias.....56
Figura 17 - Quantidade de tecnologias utilizadas por empresa.....59
Figura 18 - Ranking de utilização das tecnologias.....59
Figura 19 - Distribuição de resultados por dimensão da sustentabilidade.....60
Figura 20 - Impactos ambientais observados após a implantação 61
Figura 21 - Comparação entre os impactos esperados e os impactos confirmados.....62
Figura 22 -Influência das tecnologias nos impactos ambientais observados.....62
Figura 23 - Fatores fundamentais para os resultados.....64
Figura 24 - Distribuição das barreiras citadas por categorias.....65
Figura 25 - Matriz “X” 66
Figura 26 - Framework 4.0/2030.....67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Quadro explicativo dos ODS …….....26
Quadro 2 - Relacionamento dos ODS com a indústria 4.0.....28
Quadro 3 - Resumo das questões elaboradas para o questionário piloto…….....45
Quadro 4 - Identificação dos estudos selecionados.....48
Quadro 5 - Frequência de ocorrência dos impactos.....51
Quadro 6 - Descrição de cargos.....53
Quadro 7 - Período de implantação.....54
Quadro 8 - Motivação para implantação.....55
Quadro 9 - Objetivos da implantação.....56
Quadro10 - Tecnologias utilizadas pelas empresas entrevistadas.....58
Quadro 11 - Índices Ambientais.....68
Quadro 12 - Metas sugeridas.....68
Quadro 13 - Quadro de escolha de tecnologias.....69

SUMÁRIO

Introdução

1	**Referencial Teórico**	16
1.1	Indústria 4.0	16
1.1.1	Princípios	19
1.1.2	Tecnologias	20
1.2	Sustentabilidade	22
1.2.1	Sustentabilidade Ambiental	24
1.2.1.1	Agenda 2030 e os ODS da ONU	25
1.2.1.2	Sustentabilidade Ambiental e Indústria 4.0	27
1.2.2	Economia Circular	29
1.2.2.1	Framework ReSOLVE	32
1.2.2.2	Economia Circular e Indústria 4.0	33
1.3	Indústria Brasileira	35
1.3.1	Indústria 4.0 no Brasil	38
2	**Metodologia**	**40**
2.1	Planejamento da Pesquisa	40
2.2	Pesquisa Bibliográfica Exploratória	41
2.3	Revisão Sistemática da Literatura	41
2.4	Pesquisa de Campo	43
2.4.1	Elaboração do Projeto	43
2.4.2	Teste do Instrumento de Pesquisa	46
2.4.3	Coleta de Dados	46
2.4.4	Extração e Análise dos Resultados	46
3	**Resultados**	**46**
3.1	Revisão Sistemática	46
3.1.1	Impactos da Indústria 4.0 na Sustentabilidade Ambiental	49
3.2	Pesquisa de Campo	52

3.2.1	Perfil dos Respondentes	52
3.2.2	Perfil das Empresas Respondentes	53
3.2.3	Objetivos da Implantação	55
3.2.4	Resultados Obtidos Pelas Empresas com a Implantação das Tecnologias 4.0.	57
3.2.4.1	Resultados Referentes a sustentabilidade Ambiental	60
3.3	Matriz de Relacionamento entre os ODS da ONU, Indústria 4.0, Economia Circular.	65
3.4	Framework 4.0/2030	67
4	**Análise e Discussão de Resultados**	**70**
5	**Considerações Finais**	**74**
Referências		**77**
Anexos		**83**

Introdução

No período que se aproxima dos últimos 250 anos, após três revoluções industriais, o mundo e a maneira como a humanidade cria valor, sofreram modificações. Em cada uma dessas revoluções, as tecnologias, os sistemas políticos e as instituições sociais evoluíram não tão somente as indústrias, mas também a maneira como as pessoas se enxergam com relação umas às outras e ao mundo natural (SCHWAB; DAVIS, 2018). Num contexto histórico, as revoluções industriais, têm ocorrido quando novas tecnologias e novas percepções sobre o mundo, desencadeiam mudanças profundas nas estruturas sociais e nos sistemas econômicos. Com a quarta revolução industrial não está sendo diferente (KLAUS, 2016).

Atualmente estamos vivendo a quarta revolução industrial, que foi gerada com base nas tecnologias de informação e inteligência emergentes e disruptivas, dentre as quais podemos citar a inteligência artificial, robótica, *big data* e análises, *blockchain,* cibersegurança e internet das coisas, entre outras. Essas novas tecnologias estão permitindo alcançar níveis cada vez maiores de eficiência na produção (BAI *et al.*, 2020). A quarta revolução industrial se baseia na revolução digital.

As tecnologias estão cada vez mais se tornando mais sofisticadas e integradas, causando uma ruptura à terceira revolução industrial e mais uma vez transformando a sociedade e a economia global. Esta revolução não envolve apenas sistemas e máquinas inteligentes, trata-se de algo muito mais amplo. Enquanto sociedade podemos ver mudanças latentes na nossa forma de trabalhar, de buscar informações, nos comunicar e até mesmo na forma como nos expressamos. Estamos passando por uma reformulação da maneira com a qual lidamos com a produção, com o consumo, bem como com o transporte e sistemas logísticos. Essa nova maneira de usarmos a tecnologia como agente de mudança nos comportamentos e nos sistemas tanto de produção, quanto de consumo geram um potencial de regeneração e preservação dos ambientes naturais (KLAUS, 2016).

O termo “indústria 4.0”, originado na feira de *Honnover,* na Alemanha no ano de 2011, foi utilizado para descrever como a quarta revolução industrial vai revolucionar a organização das cadeias globais de valor. Com o surgimento das fábricas inteligentes emerge a possibilidade da criação de novos modelos operacionais. Contrastando com as demais revoluções industriais, a indústria 4.0 tem seu foco na troca de informações entre pessoas e ferramentas digitais e também entre as próprias ferramentas digitais. O conceito se baseia, na manufatura inteligente, onde as linhas de produção formam um

sistema flexível e se adaptam a diversidade de produtos e possíveis mudanças nas condições de produção (GARCÍA-MUIÑA *et al.*, 2020). A quarta revolução industrial não se refere apenas a máquinas inteligentes e conectadas e abrange também descobertas em áreas que vão do sequenciamento genético a nanotecnologia, energias renováveis e computação quântica. O seu diferencial é a fusão das tecnologias e a interação entre os domínios físicos, digitais e biológicos assim como, pela velocidade em que acontece (KLAUS, 2016).

Dentro da estrutura das tecnologias da indústria 4.0, a transformação digital está modificando o ambiente de negócio trazendo a criação de maiores oportunidades de crescimento, ganhos na eficiência e na qualidade da condução de um negócio, reduzindo custos, otimizando a experiência para o cliente e de forma inovadora propiciando novos modelos de negócio (NOVIKOK *et al.*,2020). A evolução e o desenvolvimento caminham lado a lado, desafiando cada vez mais a humanidade, trazendo dilemas e conflitos que envolvem a gestão de recursos naturais e os impactos que sua má administração podem causar. A globalização atual enfrenta o desafio de atender à demanda mundial em crescimento contínuo por bens de capital e de consumo, garantindo simultaneamente uma evolução sustentável da existência humana em suas dimensões social, ambiental e econômica (STOCK; SELIGER, 2016).

O aumento da pressão para que as empresas operem de forma que se enquadrem dentro dos padrões de sustentabilidade, resulta na busca das empresas, por uma atuação que integre as três dimensões da sustentabilidade, almejando a criação de valor compartilhado para todos os stakeholders, inclusive o meio ambiente e a sociedade (BOCKEN; RANA; SHORT, 2015). As tecnologias digitais são vistas como potenciais impulsionadores para a transformação da produção industrial rumo a uma economia mais sustentável, que é fundamental para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento da ONU (KHAN *et al.*, 2022)

A quarta revolução industrial pode potencialmente resolver muitas das limitações ecológicas referentes às práticas e tecnologias industriais tradicionais visando fornecer um futuro mais sustentável (MORRAR; ARMAN, 2017). A discussão sobre os impactos da implantação da indústria 4.0 ainda estão em debate, por se tratar de um tema relativamente novo. Para Bai *et al*. (2020) a avaliação dos benefícios da Industria 4.0 para a sustentabilidade pode resultar num aumento de sua adoção estratégica e uma melhor compreensão sobre a relação dessas novas tecnologias com a sustentabilidade são de grande importância para que os profissionais possam tomar decisões de investimento. Akbari e Hopkins (2022) ressaltam em sua pesquisa a importância da sustentabilidade e

da indústria 4.0 para as atuais cadeias de suprimentos e que as novas tecnologias podem ser consideradas como componentes críticos para a realização de diversas práticas sustentáveis como a economia circular.

As principais nações industrializadas, como a Alemanha, colocam o desenvolvimento da Indústria 4.0 no centro de suas estratégias políticas para aumentar sua competitividade. E o Brasil, se quiser participar como player global no seguimento industrial, precisa fazer o mesmo (MOURA *et al.* 2020).

Objetivo Geral.

O objetivo geral desta dissertação é fornecer um panorama das oportunidades associadas a sustentabilidade ambiental trazidas pela implementação das tecnologias englobadas pelo conceito de indústria 4.0, por meio da experiência das empresas que já passaram por esta implantação no Brasil e explorar como tais oportunidades podem impulsionar o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis da ONU para a Agenda 2030.

Objetivos específicos.

Considerando o objetivo geral foram traçados os seguintes objetivos específicos para este estudo:

a) Mapear quais são os possíveis impactos relacionados à sustentabilidade ambiental ocasionados pela adoção da indústria 4.0, que já foram evidenciados na pesquisa já existente.
b) Realizar uma pesquisa de campo com as empresas selecionadas, para mapear quais são os reais resultados ambientais causados pela aplicação do conceito de indústria 4.0.
c) Fazer uma análise comparativa entre as informações levantadas na literatura e as informações obtidas na pesquisa realizada com as indústrias e assim verificar se os efeitos esperados se confirmam na realidade da indústria no Brasil e se existem efeitos ou oportunidades que ainda não foram documentados.

d) Elaborar um framework que seja capaz de orientar os possíveis interessados

em implementar a indústria 4.0, visando a sustentabilidade a ambiental.

e) Contribuir para a redução da escassez de literatura sobre exemplos empíricos do uso das tecnologias 4.0 no que tange a sustentabilidade ambiental.

Justificativa e Relevância da Pesquisa.

Apesar de já existirem na literatura diversas pesquisas que abordem o tema Indústria 4.0, no que se refere a questão dos efeitos da mesma na sustentabilidade ambiental o tema não foi bem explorado. Margherita e Braccini (2020) afirmam em seu estudo, que uma recente revisão sobre casos empíricos que investigam os efeitos da indústria 4.0 na sustentabilidade, constata que apenas a minoria se volta para a sustentabilidade ambiental.

Segundo Bonilla et al. (2018) a relevância do tema é reforçada pela tendência crescente na literatura que fala sobre sustentabilidade, porém existe uma visão unânime de que ainda não se tem clareza sobre os impactos a longo prazo ocasionados pela Indústria 4.0 no que toca o desenvolvimento sustentável. A falta de pesquisa consistente sobre o tema também é citada por Kamble *et al.* (2018) que afirma ter incerteza no conhecimento sobre a relação entre a sustentabilidade e Indústria 4.0 e por Oluyisola *et al.* (2020) que destaca que o conteúdo empírico sobre o assunto é limitado.

As afirmações destes autores, pôde ser confirmada após a conclusão de um estudo prévio a esta dissertação, realizado pela autora, que investiga a contribuição das tecnologias da indústria 4.0 para a sustentabilidade, no qual foi possível verificar a escassez de estudos sobre o tema, principalmente quando nos referimos a exploração de experiências concretas, de resultados obtidos nas organizações que já adotaram as medidas para a implantação da indústria 4.0 (GERMANO *et a*l.,2021).

Grande parte do consumo dos recursos naturais e da geração de gases de efeito estufa, são provenientes dos processos de fabricação. O setor industrial é responsável por pelo menos metade do consumo de energia entregue em escala mundial. (Oluyisola *et al*.,2020). Segundo o portal da EPE (Empresa de Pesquisa Energética) a indústria é responsável pelo consumo de cerca de 40% da eletricidade e mais de 30% do total de energia do Brasil. Esta demanda é impactada diretamente pelo uso de instalações industriais tais como motores, bombas, compressores, o que evidencia a necessidade de se avaliar novas propostas que influencie na eficiência energética das indústrias (EPE,2022). Tanto a Agenda 2030 da ONU, quantos seus Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), conferem a tecnologia uma grande importância no refreamento das

mudanças climáticas e no desenvolvimento sustentável (FRITZSCHE *et al.*, 2018).

Diante da necessidade de se buscar soluções que promovam o desenvolvimento sustentável, da urgência por medidas que desacelerem os impactos ambientais negativos e da lacuna evidenciada, no estudo de Germano *et al.* (2021) sobre pesquisas que evidenciem os impactos da indústria 4.0 na sustentabilidade , inclusive em sua dimensão ambiental é que baseia a questão norteadora desta dissertação, que se propõe a fazer o levantamento de quais são os impactos esperados pela implementação da indústria 4.0 na sustentabilidade ambiental das empresas e quais foram os reais resultados alcançados pelas organizações que já adotaram as tecnologias e medidas referentes a quarta revolução industrial no Brasil.

Este estudo busca trazer como contribuição científica, maior esclarecimento e consolidação sobre os efeitos ambientais trazidos pela indústria 4.0, podendo desta forma auxiliar na tomada de decisão e no direcionamento das empresas que pretendem adotar estes tipos de tecnologia, bem como despertar nos gestores públicos, iniciativas que fomentem a indústria 4.0, para que a adoção da mesma possa ser uma ferramenta de contribuição para o alcance das metas trazidas pelos ODS e pela Agenda 2030.

Além desta introdução, esta dissertação traz em sua estrutura outros cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta o referencial teórico, onde foi desenvolvida a revisão da literatura a respeito dos conceitos e teorias utilizadas como base para a construção desta pesquisa. O Capítulo 2 descreve toda a metodologia aplicada ao longo do desenvolvimento deste estudo. O Capítulo 3 é composto pela exposição dos resultados obtidos que se dividem em revisão sistemática da literatura, pesquisa de campo e elaboração do framework. Em seguida temos o capítulo 4 elaborado a partir da análise e discussão dos resultados apresentados, finalizando com Capítulo 5, onde são realizadas as considerações finais desta pesquisa.

1 Referencial teórico

1.1 - Indústria 4.0.

Num contexto histórico, a palavra “revolução” sempre nos remete a ideia de uma mudança abrupta. As grandes revoluções da humanidade, tem se dado diante de novas tecnologias que surgem e transformam a forma de perceber o mundo, desencadeando assim alterações significativas nas estruturas sociais e nos sistemas econômicos (KLAUS, 2016). A revolução agrícola, foi o primeiro grande marco e se desenvolveu a partir da combinação da força dos animais e dos seres humanos em prol da produção,

do transporte e da comunicação, que estimulando o crescimento da população, levou à urbanização e ao surgimento das cidades. Após esta revolução, a partir da segunda metade do século XVIII, tivemos uma série de revoluções industriais, marcadas pela transição da força muscular para a energia mecânica, evoluindo até chegar a atual quarta revolução industrial (KLAUS, 2016). A seguir temos a representação desta evolução na figura1.

Figura 1:Evolução das revoluções industriais.



Fonte: Pinheiro (2021).

A primeira revolução industrial se desenvolveu entre o período compreendido entre os anos 1760 e 1840 com a construção de ferrovias e pela invenção das máquinas a vapor dando início a produção mecânica. A segunda se deu entre o final do século XIX e início do século XX, coma chegada da eletricidade e da adoção da linha de montagem, possibilitando a produção em massa. A terceira teve início na década de 1960, também chamada de revolução digital ou do computador, por ter sido impulsionada pela invenção do mesmo (KLAUS, 2016).

Hoje estamos vivendo a quarta revolução industrial, uma revolução digital. Estamos passando por uma mudança de paradigma que está mudando a forma da sociedade trabalhar, se comunicar e se expressar. A mesma mudança está ocorrendo com o governo e muitos outros sistemas, como o de educação, saúde e transportes, através de uma nova maneira de usar a tecnologia. A quarta revolução industrial vai além de sistemas e máquinas inteligentes conectadas. Novas descobertas emergem em áreas

que compreendem desde o sequenciamento genético até a nanotecnologia, energias renováveis e computação quântica. O seu diferencial é a fusão dessas tecnologias e a interação entre os domínios físicos digitais e biológicos (KLAUS, 2016).

Ao discutir como as tecnologias permitiriam a criação de “fábricas inteligentes” revolucionando as cadeias globais de valor foi cunhado o termo “Indústria 4.0”. O conceito de Indústria 4.0 é relativamente novo e sua proposta foi apresentada na Feira de Hannover, uma das maiores feiras de tecnologia do mundo, na Alemanha em 2011. Segundo Klaus (2016), doutor em economia e fundador e presidente executivo do Fórum Econômico Mundial (FEM), estamos vivendo uma revolução tecnológica, que resultará na transformação da humanidade e isso passa pela reformulação da produção, do consumo, do transporte e dos sistemas logísticos. As novas formas de aplicação das tecnologias emergentes utilizadas para alterar os padrões de produção e consumo também são vistas como potenciais fatores de regeneração preservação dos ambientes naturais e todos os stakeholders, o que inclui governos, empresas, universidades e sociedade civil, devem se unir para entender melhor essas novas tendências.

Na iniciativa de despontar um novo momento para a manufatura e levando em consideração a transformação digital mundial, a indústria 4.0 se tornou, para o Governo alemão, uma importante ação para impulsionar a sua indústria. Juntamente com diversas organizações e a academia o governo começou a construir suas bases, desenvolver seus conceitos, modelos, métodos e novas tecnologias resultando na evolução dessa nova indústria, trazendo também o conceito das fábricas inteligentes, que se trata de fábricas dotadas destas novas tecnologias capacitadoras provenientes da indústria 4.0 (MOURA *et al.*, 2020),

A intenção é otimizar todos os processos de produção através da interação entre todos os processos da cadeia de produção, com essas tecnologias. Segundo García-Muiña *et al.* (2020) a adoção das novas tecnologias está direcionando as empresas para um maior nível de consciência dos mecanismos que impulsionam os processos de produção resultando assim numa elevação dos níveis de produtividade. Ainda neste contexto o aumento do nível de produção, utilizando uma menor quantidade de recursos e energia é possível através da flexibilidade trazida pelos sistemas ciber-físicos, que permitem a otimização contínua do consumo de recursos e de energia. É possível por exemplo controlar o consumo de matéria-prima, o nível de produção de acordo com a demanda real. Sensores são instalados para fazer todo o monitoramento da fábrica em tempo real, tornando assim, possível verificar uma necessidade de intervenção em uma máquina, para que não se desperdice recursos nem prejudique a produção.

Diversas novas tecnologias estão sendo desenvolvidas ou aproveitadas para integrar as fábricas inteligentes, frutos desta nova era para a manufatura. Bai *et al.* (2020), ressalta a importância de se avaliar cada uma dessas tecnologias de forma cuidadosa, pois cada uma delas vai influenciar as dimensões da indústria e da sustentabilidade de forma variável.

1.1.1 Princípios.

Para que a implantação da indústria 4.0 tenha um pleno desenvolvimento e seja considerada bem-sucedida, alguns princípios devem ser considerados. Segundo Hermann *et al.* (2016) deve-se respaldar nos seguintes princípios:

a) Interoperabilidade: Trata-se da comunicação constante, promovida entre as máquinas utilizadas nos processos e seus responsáveis além da capacidade de comunicação entre sistemas distintos. Pode ser visto como um facilitador para viabilizar a indústria 4.0, sendo considerado o primeiro passo para a adesão à esta nova era industrial (SCHWAB e MACKENZIE, 2016).

b) Virtualização: É a virtualização dos processos, que prevê inclusive a instalação de sensores por toda a fábrica que são capazes de extrair informações através do monitoramento dos processos (HERMANN *et al*. ,2016)

c) Descentralização: A capacidade de tomada e decisão deixa de depender do sistema do sistema de computação centralizado do órgão de tomada de decisão e alcança também a equipe de operações e até mesmo as máquinas. Possibilitando maior agilidade e flexibilidade na tomada de decisão (KAMBLE *et al.*, 2018).

d) Capacidade em tempo real: É a capacidade de gerar, processar e monitorar dados em tempo real, ou seja, coletar as informações de forma instantânea. Este monitoramento pode ocorrer dentro ou fora do espaço físico da empresa, facilitando cada vez mais a tomada de decisão (HERMANN *et al.* ,2016)

e) Orientação à serviço: Fundamenta-se na customização de softwares de acordo com as necessidades de cada organização, através da internet de serviços é

permitida a integração de máquinas e usuários através de programas respeitando cada necessidade, resultando numa maior usabilidade das ferramentas de integração da organização (SORIANO *et al*., 2013).

f) Modularidade: Trata-se da flexibilização de todo o processo produtivo a partir da formação de vários módulos, que podem ser acoplados ou desacoplados entre si, permitindo que desta forma os processos se tornem mais dinâmicos e rápidos, para maior agilidade no atendimento das demandas dos clientes. A modularidade possibilita ajustes de capacidade em situações sazonais e facilita a simulação de processos de fabricação (KAMBLE *et al.*, 2018).

1.1.2 Tecnologias.

As principais tecnologias mencionadas pelos pesquisadores do assunto serão mencionadas abaixo, porém cabe ressaltar que existem muitas outras tecnologias relacionadas a indústria 4.0.

a) Internet das coisas (*Internet of thing; IoT)*: Também é conhecida como “a internet de todas as coisas” e podemos definir como uma grande rede onde pessoas e coisas se conectam, coletam e compartilham dados sobre o seu comportamento ou funcionamento e até mesmo sobre o ambiente que as cercam. Segundo Klaus (2016) pode-se dizer que se trata da relação entre as coisas como produtos, serviços, lugares e as pessoas, que se torna possível através de inúmeras plataformas e tecnologias conectadas. Bai *et al.* (2020) define como “vários conjuntos de peças de hardware que funcionam juntos por meio da conectividade da Internet das coisas para ajudar a aprimorar os processos de fabricação e industriais”, toda essa integração se dá por meio de sensores instalados ao longo de toda cadeia de produção. Galegale *et al.* (2016), conclui em sua pesquisa, onde faz um estudo bibliométrico sobre a IoT, que existem diversas definições para o termo e que sua maioria se refere a sensores ou microchips, que ao se conectar a objetos físicos, promovem a interação homem-objeto e objeto-objeto, tendo assim diversas aplicações incluindo o uso pessoal e os negócios.

b) *Big Data*: O volume de dados gerados cresce exponencialmente com o passar dos anos. À medida em que as tecnologias de sensor evoluem, aumenta a contribuição de dados, para os bancos de dados organizacionais. As melhorias

efetuadas nas tecnologias de armazenamento trazem como consequência o custo de avaliar, selecionar e destruir dados antigos, não os deixando apenas se acumular. O grande volume de dados armazenados oferece a oportunidade de inter-relacioná-los resultando numa análise mais eficiente (CLARKE, 2015). Segundo Junior (2012), big data se apresenta como um conjunto de dados com um tamanho superior a habilidade que as ferramentas típicas de bancos de dados possuem para capturar e analisar esses dados. Para BAI et al. (2020) é a tecnologia que permite coletar e analisar o grande volume de dados gerados pela implantação da indústria 4.0, a estratégia utilizada quando as técnicas tradicionais de mineração e tratamento de dados não são suficientes para descobrir os insights e o significado dos dados obtidos. O termo Big data apara a indústria 4.0 é visto como as soluções tecnológicas aplicadas para o tratamento e análise do grande volume de dados gerados pelas demais tecnologias implantadas, como a IoT, com seus sensores distribuídos ao longo de toda a cadeia produtiva, gerando dados em tempo real. Cabe ressaltar a importância da utilização desta tecnologia tendo em vista que a indústria 4.0 processa os dados, para que o conhecimento obtido através dos mesmos, seja utilizado como base para a tomada de decisão.

c) Cibersegurança ou segurança cibernética: Diante do grande volume de dados gerados pela implantação das novas tecnologias que se associam ao big data, temos também que voltar nossa atenção para a possibilidade de fragilidade nesses sistemas ao que se refere a segurança dos dados. Para Culot *et al.* (2019) a cibersegurança extrapola os limites da empresa quando se trata de indústria 4.0, envolvendo fornecedores, parceiros da cadeia de suprimentos e até mesmo os clientes de produtos conectados e serviços digitais. A cibersegurança trata dos métodos preventivos utilizados para proteger as informações de serem roubadas, comprometidas ou atacadas. Bai *et al.* (2020). A segurança cibernética é desafiadora quando falamos de indústria 4.0, se faz necessário a utilização de estruturas mais seguras, sofisticadas e confiáveis para máquinas e operadores, sendo necessário conectar e utilizar um protocolo de comunicação padrão para fins operacionais (MOKTADIR *et al.*,2018)

d) Robôs autônomos e Inteligência Artificial: São robôs ou máquinas que possuem a capacidade de realizar tarefas sem a intervenção humana, incluindo a possibilidade de tomada decisões não programadas através da inteligência

artificial. “É uma área da ciência da computação que enfatiza a criação de máquinas inteligentes que funcionam e reagem como humanos.” Bai *et al.* (2020). É de grande importância dentro da jornada da indústria 4.0. Um robô autônomo é capaz de operar com uma maior precisão onde os trabalhadores apresentem certa incapacidade ou restrição para lidar com determinados tipos de operação (MOKTADIR *et al.*, 2018).

e) Realidade Aumentada: Trata- se de uma tecnologia que permite sobrepor elementos virtuais à nossa visão real das coisas. “É um tipo de ambiente de exibição interativo baseado em realidade que usa os recursos de exibição, som e outros efeitos gerados por computador para aprimorar a experiência do mundo real.” Bai *et al.* (2020). Na indústria 4.0, através de dispositivos móveis que recebem dados em tempo real, das máquinas, câmeras e de outros sistemas é possível visualizar a projeção de cenários virtuais que auxiliam na tomada de decisão.

f) Simulação: Se refere a possibilidade de simular cenários virtualmente, são tecnologias que utilizam o computador para a reprodução de um processo ou sistema real Bai *et al.* (2020). Pode ser utilizado para o desenvolvimento de novos produtos, corrigir possíveis erros de produção e principalmente otimizar processos num tempo menor e com maior economia de recursos.

g) Impressão 3D: Nada mais é do que a produção em baixa escala e com custo reduzido de produtos através de uma impressora 3D. Esta tecnologia permite também a impressão de peças de manutenção o que gera uma economia que engloba tanto a questão financeira quanto a questão de desperdício de tempo nos processos de produção Bai *et al.* (2020).

1.2 - Sustentabilidade.

O termo sustentabilidade juntamente com o termo desenvolvimento sustentável, vem se tornando cada vez mais popular e ganhando cada vez mais espaço no ramo da pesquisa. É possível observar um aumento de mais 400%, quando buscamos estudos publicados em pelo menos duas das bases de dados de maior expressão, que são, a Web of Science e a SCOPUS, no período dos últimos 10 anos, utilizando o termo “sustainability”.

Os impactos negativos oriundos principalmente das indústrias, das forças de mercado e dos excessos do sistema capitalista sobre o ambiente natural, levou a geração de diversos debates, como os realizados pelas conferências da Organização das Nações Unidas(ONU) em Estocolmo, na Suécia em 1972, em Nairóbi, no Quênia em 1982, que finalmente culminariam na conceituação de desenvolvimento sustentável em 1987, com o Relatório Brundtland, elaborado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento(CMMAD), que define o desenvolvimento sustentável como um modelo de desenvolvimento que visa atender às necessidades da geração presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades(MAIA *et al.*, 2011).

A Sustentabilidade passou por diversos processos de desenvolvimento e de evolução do seu conceito desde sua primeira aparição. Através de várias conferências, dentro de organizações e instituições, recebeu diferentes críticas e interpretações, porém tem sido aceito em diversos campos de atividades (IVASCU *et al.*, 2020). Segundo Maia et al. (2011) os três componentes fundamentais para o desenvolvimento sustentável presentes no Relatório Brundtland, que são a proteção ambiental, o crescimento econômico e a equidade social, representam para diversos autores as dimensões da sustentabilidade, o que seria denominado por Elkington, J. no ano de 1997 em seu livro, Canibais com garfos: o triplo resultado dos negócios do século 21, como *Triple Bottom Line* (TBL) ou tripé da sustentabilidade. Esta visão traz a sustentabilidade com uma face tridimensional, que abrange três dimensões ou pilares, o ambiental, o social e o econômico. Estes três pilares devem atuar como norteadores de decisões e ações relacionadas à gestão organizacional para se alcançar o desenvolvimento sustentável.

Cada uma dessas dimensões que serão apresentadas abaixo, se apresenta como condição necessária, porém não como condição suficiente para alcançar a sustentabilidade empresarial. Quando apenas uma delas não é alcançada, já não podemos dizer que a organização age de forma sustentável (BRACCINI *et al*., 2018).

a) Dimensão social: Está relacionado com as atitudes das organizações que estão voltadas para a preservação do capital humano e social pertencentes às comunidades nas quais as organizações operam para a criação de valor, englobando também aspectos como satisfação no trabalho, qualidade de vida e integração social nas comunidades (BRACCINI *et al.,* 2018). É promover a responsabilidade social dentro e fora dos limites das empresas, oferecendo boas

condições de trabalho, além de atuar no desenvolvimento da comunidade onde a organização está inserida, através de projetos sociais, programas que promovam a educação e a valorização da mão de obra local por exemplo.

b) Dimensão econômica: Refere-se à criação de valor equilibrando custos e receitas seja na produção ou na distribuição dos bens e serviços. Traz a preocupação com o desempenho econômico e financeiro das organizações (BRACCINI *et al*., 2018). Trata –se da gestão responsável do patrimônio das empresas, o que exige um maior cuidado na análise de orçamentos, investimentos e de toda a parte financeira e fiscal das organizações.

c) Dimensão ambiental: Trata-se da manutenção de práticas de produção mais adequadas, da exploração responsável dos recursos naturais, garantindo sua continuidade, controlando a emissão de poluentes e descarte adequado ou reciclagem de resíduos. Concentra-se na compatibilidade entre o uso e a renovação dos recursos naturais, onde as organizações devem consumir apenas o que pode ser reproduzido pela natureza, gerar apenas as emissões que possam de absorvidas pelo ecossistema existente. Isso pode ocorrer através do redesenho dos processos visando a redução ou substituição de recursos renováveis por não renováveis (BRACCINI *et al.,* 2018).

1.2.1 Sustentabilidade Ambiental.

A sustentabilidade ambiental traz as restrições ecológicas como limites para a produção. A exploração de recursos não deve ultrapassar a taxa de regeneração dos recursos naturais, bem como não se deve gerar mais resíduos do que a biosfera e capaz de assimilar (BONILLA *et al.*, 2018). A publicação do relatório de “Brundtland” no ano de 1987, que deu origem ao termo “desenvolvimento sustentável”, gerou um movimento de crescimento no que toca a consciência da sociedade sobre os impactos ambientais gerados pela manufatura industrial.

Ao longo do tempo o conceito de desenvolvimento sustentável, foi se adaptando as exigências ambientais e tecnológicas, porém seus objetivos e princípios continuaram presentes. Após publicação do relatório de Brundtland, foram realizadas diversas conferências, relatórios e cúpulas, como a Cúpula do Rio de 1992, conhecida oficialmente como Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento

(UNCED), que visava parcerias internacionais para que se chegar ao desenvolvimento sustentável mundial. A Rio 92 deu origem a declaração do Rio, que trazia 27 princípios norteadores para o desenvolvimento sustentável e a Agenda 21, que se tratava de um plano de ação para alcançar este objetivo a nível mundial. Nos anos 2000 em Nova York, ocorreu a cúpula do Milênio, onde as grandes Nações promoveram uma parceria global para reduzir a pobreza extrema e traçaram um conjunto de oito Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), que deveriam ser cumpridos até o ano de 2015. No ano 2002, tivemos a conferência de Joanesburgo ou Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável, onde foi feito um balanço sobre a implementação da Agenda 21 e reafirmação dos compromissos do ODM. Já em 2012 ocorreu a Rio +20, onde além da avaliação do andamento dos ODM, foi iniciado o processo para desenvolver os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) para o período posterior ao ano de 2015. Finalmente no ano de 2015, foi estabelecida a Agenda 2030, pela Cúpula de Desenvolvimento Sustentável. Ela apresenta os 17 ODS, que foram ratificados por 193 nações e o prazo para alcançar os objetivos é o ano de 2030 (PEDERCINI *et al*.,2020).

1.2.1.1 Agenda 2030 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU.

A Agenda 2030 é um plano de ação que faz parte de um pacto global em favor do desenvolvimento sustentável, que teve sua origem a partir de uma iniciativa da ONU (Organização das Nações Unidas), que visa garantir o desenvolvimento humano, bem como as necessidades básicas do cidadão através de um processo econômico, político e social, respeitando a sustentabilidade e o meio ambiente.

No ano de 2015 o Brasil, acompanhado de mais 192 países, se comprometeu a libertar a raça humana da tirania da pobreza e da penúria, curar e proteger nosso planeta, tendo então que tomar medidas que leve o mundo a um caminho mais sustentável. A agenda 2030 é composta por 17 Objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) que por sua vez são compostos por 169 metas que devem ser cumpridas até o ano de 2030. Os ODS estão representados na figura 2.

Figura 2: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.



Fonte: (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2022)

O quadro 1 a seguir, traz uma breve explicação sobre cada um dos objetivos.

Quadro1: Quadro explicativo dos ODS.

Objetivos de Desenvolvimentos Sustentável		
1	**Erradicação da pobreza.**	Erradicar a pobreza em todas as formas e em todos os lugares.
2	**Fome Zero e agricultura sustentável.**	Erradicar a fome, alcançar a segurança alimentar, melhorar a nutrição e promover a agricultura sustentável.
3	**Saúde e bem-estar.**	Garantir o acesso à saúde de qualidade e promover o bem-estar para todos, em todas as idades.
4	**Educação de qualidade.**	Garantir o acesso à educação inclusiva, de qualidade e equitativa, e promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos.
5	**Igualdade de gênero.**	Alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as mulheres e meninas.
6	**Água potável e saneamento.**	Garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento para todos.

7	**Energia limpa e acessível.**	Garantir o acesso a fontes de energia fiáveis, sustentáveis e modernas para todos.
8	**Trabalho decente e crescimento econômico.**	Promover o crescimento econômico inclusivo e sustentável, o emprego pleno e produtivo e o trabalho digno para todos.
9	**Indústria, inovação e infraestrutura.**	Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação.
10	**Redução das desigualdades.**	Reduzir as desigualdades no interior dos países e entre países.
11	**Cidades e comunidades sustentáveis.**	Tornar as cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis.
12	**Consumo e produção responsáveis.**	Garantir padrões de consumo e de produção sustentáveis.
13	**Ação contra a mudança global do Clima.**	Adotar medidas urgentes para combater as alterações climáticas e os seus impactos.
14	**Vida na água.**	Conservar e usar de forma sustentável os oceanos, mares e os recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável.
15	**Vida Terrestre.**	Proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, travar e reverter a degradação dos solos e travar a perda da biodiversidade.
16	**Paz, justiça, e instituições eficazes.**	Promover sociedades pacíficas e inclusivas para o desenvolvimento sustentável, proporcionar o acesso à justiça para todos e construir instituições eficazes, responsáveis e inclusivas a todos os níveis.
17	**Parcerias e Meios de implementação.**	Reforçar os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável.

Fonte: Elaborado pela autora com base nas informações do portal das Nações Unidas no Brasil (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2022)

1.2.1.2 Sustentabilidade Ambiental e Indústria 4.0

O movimento que trouxe uma maior consciência para a sociedade sobre os impactos ambientais gerados pela manufatura também gerou uma maior preocupação com a questão da disponibilidade dos recursos naturais não renováveis, além de despertar nos consumidores a preferência por produtos ecologicamente corretos. Este movimento exigiu das empresas de manufatura, que as mesmas levassem em consideração a sustentabilidade na sua cadeia de suprimentos (BROZZI *et al.,* 2020) O

cenário mundial de escassez de recursos naturais e desequilíbrios ambientais, sociais e econômicos, motiva as práticas sustentáveis nas organizações. (IVASCU *et al.,* 2020).

Neste contexto que envolve desafios ambientais urgentes a indústria 4.0 surge como uma nova possibilidade de alavancar a sustentabilidade, englobando todas as suas dimensões dentro das organizações, porém a dimensão ambiental será abordada mais detalhadamente por ser o foco deste estudo. De acordo com Brozzi *et al.* (2020), a indústria 4.0 foi identificada como uma oportunidade mais sustentável na criação de valor industrial na manufatura, tendo em vista que suas tecnologias, que fornecem informações detalhadas sobre todo o processo de produção pode gerar a otimização do uso de recursos. Para Oluyisola *et al.* (2020), as tecnologias de informação relacionadas a indústria 4.0 tem potencial para transformar todas as fases do ciclo de vida do produto, desde o design até a reciclagem, pois permite planejar e controlar todas as operações da fábrica e da cadeia de suprimentos em tempo real, resultando na diminuição do desperdício.

Bai *et al*. (2020) em seu estudo, nos diz que a indústria 4.0 tem potencial para beneficiar todos os ODS. O quadro 2 abaixo, foi confeccionada com base em seu estudo, porém evidenciando apenas os ODS que estão ligados a sustentabilidade ambiental.

Quadro2: Relacionamento dos ODS com a indústria 4.0.

ODS	Relacionamento com tecnologias da Indústria 4.0
Energia limpa e acessível	As tecnologias da Indústria 4.0 trarão eficiência energética sustentável para permitir maior qualidade e economia de custos para os usuários.
Indústria, inovação e infraestrutura	As tecnologias da Indústria 4.0, sejam as novas indústrias e as tecnologias da informação e comunicação, são os meios importantes para a promoção de indústrias sustentáveis, investindo na investigação científica e na inovação, modernizando as infraestruturas
Consumo e produção sustentáveis	As tecnologias da Indústria 4.0 já estão sendo usadas para trazer maior eficiência entre as indústrias, maior transparência nas cadeias de abastecimento e melhores padrões de produção e consumo.
Ação contra a mudança global do clima	As tecnologias da indústria 4.0 podem levar a uma redução das emissões de CO2 por pegada de carbono rastreável e centrada em dados.

Vida na água	As tecnologias da Indústria 4.0 podem contribuir para o uso mais sustentável dos recursos dos oceanos.
Vida terrestre	As tecnologias da Indústria 4.0 são essenciais para o manejo das florestas e da biodiversidade.

Fonte: (BAI *et al.*, 2020)

1.2.2 Economia Circular.

A economia circular se apresenta como um conceito que seria capaz de servir como um meio de ajudar as empresas e a sociedade como um todo a trilharem um caminho rumo à sustentabilidade, se revelando como uma alternativa ao modelo econômico linear. O modelo econômico circular promove uma utilização de forma rotatória dos materiais, através da devolução de resíduos que são transformados em novos recursos e então devolvidos ao processo de fabricação. Este modelo preza pelo uso sustentável dos recursos naturais, aumentando a circularidade dos recursos dentro dos sistemas de fabricação, tendo em vista a finitude dos mesmos.

O modelo econômico que ainda se faz predominante mundialmente é o modelo de economia linear. Este modelo de economia se organiza de maneira que, após extraídos, os recursos naturais são transformados em bens, esses bens são consumidos e logo após descartados, como o representado na figura 3, sem maiores preocupações com a inevitável finitude dos recursos e com geração excessiva de resíduos. Este modelo vem se tornando claramente insustentável.

Figura 3: Representação do modelo de Economia Linear.



Fonte:(IDEIA CIRCULAR, 2022)

Mesmo diante de um esforço por parte das indústrias em melhorar o seu desempenho ambiental ao longo dos anos, as atividades industriais continuam sendo altamente prejudiciais ao meio ambiente, gerando uma intensa quantidade de resíduos e

poluição. Tendo em vista que a maioria das empresas ainda não conseguiu integrar a sustentabilidade ambiental à suas atividades operacionais. Para alcançar novos padrões de consumo e produção que sejam sustentáveis, novas abordagens precisam ser inseridas no contexto industrial. A economia circular se apresenta como uma alternativa para alcançar esses padrões almejados (VILES *et al.*, 2022).

O termo “Economia Circular”, foi utilizado pela primeira vez por Pearce e Turner em 1990, porém ganhou popularidade através do trabalho realizado pela Ellen MacArthur Foundation por volta do ano de 2012 (VILES *et al.*, 2022). Dentro de uma perspectiva de desenvolvimento sustentável o conceito de economia circular foi definido por Kornonen et al. (2018) como “…uma economia construída a partir de sistemas sociais de produção-consumo que maximizam o serviço produzido a partir do fluxo linear natureza-sociedade-natureza material e energia. Isso é alcançado usando fluxos de materiais cíclicos, fontes de energia renováveis e fluxos de energia tipo cascata.”

A Ellen MacArthur Foundation (EMF) é uma instituição conhecida mundialmente pelo seu trabalho com a Economia Circular e se destaca pela criação de pesquisas que evidenciam os benefícios pela adoção da mesma. A instituição busca contribuir com a solução para desafios ambientais como a mudança climática e perda de biodiversidade, através da promoção das práticas de economia circular.

O fluxo de materiais dentro de um sistema de economia circular, pode ser representado pelo diagrama de borboleta, conforme o ilustrado na figura 4, que traz uma adaptação do diagrama criado pela Ellen MacArthur Foundation.

Figura 4: Adaptação do diagrama de borboleta Ellen MacArthur Foundation.



Fonte:(IDEIA CIRCULAR, 2022)

Neste diagrama é possível identificar que a economia circular se baseia em dois ciclos, o técnico e o biológico. No ciclo técnico temos a circulação dos produtos e dos materiais, classificados como recursos finitos, mantida através da manutenção, reutilização ou redistribuição, remanufatura e da reciclagem. Já no ciclo biológico os recursos ditos como renováveis, circulam de uma forma na qual os nutrientes provenientes dos materiais biodegradáveis retornam a natureza para a sua regeneração o que auxilia na redução da extração de recursos naturais brutos, fazendo com que os materiais sejam utilizados de forma mais sustentável, aderindo inclusive a métodos de assimilação anaeróbia na gestão de resíduos (AKKAD *et al.*, 2022).

Ainda segundo a EMF (2015), a economia circular se apoia em três princípios:

- Princípio 1: Preservar e aprimorar o capital natural controlando estoques finitos e equilibrando os fluxos de recursos renováveis. Este princípio promove a desmaterialização dos produtos e serviços, transformando-os em virtuais sempre que existir esta possibilidade e quando não for possível lançar mão de tecnologias e processos que façam uso de recursos renováveis ou apresente um desempenho mais satisfatório.
- Princípio 2: Otimizar o rendimento de recursos fazendo circular produtos, componentes e materiais no mais alto nível de utilidade o tempo todo, tanto no ciclo técnico quanto no biológico. A ideia é manter os materiais o maior tempo possível em circulação, almejando a preservação dos recursos, energia, através da manutenção ou reciclagem. Este princípio sugere projetar visando a remanufatura, a renovação e a reciclagem.
- Princípio 3: Estimular a efetividade do sistema revelando e excluindo as externalidades negativas desde o princípio. Engloba a redução de danos a sistemas e a diversas áreas como mobilidade, uso da terra, água, liberação de substâncias tóxicas entre outras.

Alguns autores como Pereira (2021), defendem que os ODS e suas metas só serão alcançados através da substituição do modelo linear por um modelo de produção circular, que adota sistemas que implicam em benefícios como a redução de resíduos, a utilização de recursos de forma mais sustentável, que são contribuições fundamentais para a Agenda 2030. Schroeder *et al*. (2018), também ressalta que os princípios da economia circular oferecem contribuições diretas ao alcance de diversos ODS, citando a redução de gases de efeito estufa, redução de resíduos, de consumo de materiais, poupança

energética, além da utilização de energia renovável.

1.2.2.1 Framework RESOLVE.

A Ellen MacArthur Foundation, através de sua pesquisa envolvendo estudos de caso, desenvolveu uma estrutura, que se baseia na identificação de seis ações as quais, empresas e o governo podem adotar vislumbrando uma transição para a economia circular. Esta estrutura foi denominada estrutura RESOLVE. A estrutura pode ser vista como uma ferramenta na elaboração de iniciativas e estratégias circulares, suas ações tendem a aumentar a utilização de ativos físicos, prolongando sua vida, além de promover a substituição do uso de recursos finitos pelos recursos de fontes renováveis EMF(2015). A figura 5 traz a explicação simplificada de cada umas das seis ações propostas pelo *framework, regenarate, share, optimise, loop e exchange.*

Figura 5: Adaptação do framework RESOLVE Ellen MacArthur Foundation.



Fonte: EMF(2015).

- Regenerar: Tem seu foco na mudança da utilização de fontes tradicionais de energia ou matéria-prima para energia renovável e novos materiais. A ideia é que os ciclos biológicos sejam utilizados para a circulação do fluxo de energia e materiais, que se convertem em fontes de energia e matéria-prima para outras cadeias (EMF,2015).
- Compartilhar: Visa a maximização da utilização dos produtos por meio de compartilhamento. Os produtos devem ser projetados no intuito de ter uma duração prolongada e ter maior aproveitamento por meio de manutenção ou reparos estendendo sua vida útil (EMF,2015).
- Otimizar: Tem sua estratégia voltada para o uso de tecnologia digital, como sensores, automação, big data (MACARTHUR E WAUGHRAY, 2016). Visa aumentar a eficiência da produção, trabalhando em prol da eliminação dos desperdícios nos processos de fabricação (Lewandowski, 2016).
- Loop: Utiliza os ciclos biológicos e técnicos para recuperar o valor dos resíduos ou restaurar o valor dos produtos pós consumo, por meio de reparo, reutilização, remanufatura e reciclagem (LEWANDOWSKI, 2016).
- Virtualize: É a estratégia de desmaterialização dos produtos e serviços, por alternativas virtuais (EMF,2015).
- Trocar: Tem como ideia central a substituição de materiais e tecnologias obsoletas e tradicionais por novas tecnologias ou materiais de origem renovável. (EMF,2015).

1.2.2.2 Economia Circular e Indústria 4.0.

Diversos fatores podem se tornar impedimentos para a migração de um modelo linear para um modelo circular. Em seu estudo Su *et al* (2013) identifica os principais desafios para a implementação da economia circular e destaca escassez de tecnologia avançada como um desses fatores. Em paralelo a isso, se desenvolveu o movimento da quarta revolução industrial, também chamada de indústria 4.0, que se constituiu a partir de tecnologias de informação e inteligência disruptivas. Tais tecnologias oportunizam que a produção tenha cada vez mais, altos níveis de eficiência de produção, oferecem potencial de crescimento, competitividade e inovação, fomentando o desenvolvimento sustentável (BAI et al*.,* 2020). A indústria 4.0 pode iminentemente sanar diversas limitações ecológicas das práticas e tecnologias industriais tradicionais (MORRAR *et al*, 2017).

As tecnologias 4.0 estão sendo investigadas para que que possam servir de apoio a implementação de estratégias circulares, seja no caso da tomada de decisão ou na fabricação. Diversos estudos defendem que a implementação de estratégias circulares na produção, podem ser otimizadas pela adoção de tecnologias 4.0 (ACERBI; TAISCH, 2020). Em seu estudo Garcia-Muiña *et al*. (2019) ressalta que as tecnologias digitais, o gerenciamento de big data e inteligência artificial são de grande ajuda para as empresas conceberem um modelo de negócio circular. Okorie *et al*. (2018) afirmam que a quarta revolução industrial, impulsionada pela digitalização, apresenta um grande potencial em alavancar modelos de negócios circulares, onde os recursos renováveis são consumidos, os estoques são mantidos infinitamente e o desperdício é eliminado. É aqui que a Indústria 4.0 e a economia circular se encontram e empoderam.

Em sua pesquisa Jabbour *et al.* (2018), relaciona as ações de economia circular propostas no framework RESOLVE, com oportunidades trazidas pelas tecnologias 4.0, indicando que “Regenerar” pode ser beneficiado pela aplicação da internet das coisas, que permite que as decisões de produção e gestão podem ser tomadas, baseadas nos dados captados e fornecidos por sensores e aplicativos e consequentemente, gerar a economia de recursos e melhorar a produtividade. A ação “Compartilhar”, tem seu potencial alavancado pela computação em nuvem, que permite que as pessoas se conectem e compartilhem informações sobre oferta e demanda e também pela internet das coisas, através do monitoramento de produtos durante o uso pelo consumidor, que permite que as organizações possam investir na extensão da vida útil dos produtos. Já a ação de “Otimizar”, além da internet das coisas, teria suporte dos sistemas ciber-físicos, que permitiriam através da coleta de dados dos processos, identificar falhas, monitorar e controlar o desempenho das operações, intervir e planejar a manutenção das máquinas e tudo isso acarretaria a diminuição de recursos. Para apoiar a ação “Loop”, podem ser usadas a computação e nuvem, internet das coisas e sistemas ciber-físicos, tendo como aliados o design do produto que pode incluir sensores ou chips, que permitiriam o rastreamento dos componentes dos produtos, facilitando os processos de reciclagem e manufatura. Na ação “Virtualizar” as vantagens são trazidas pela conexão entre as organizações, fornecedores e clientes, interligando oferta e demanda, possibilitada pela computação em nuvem, temos o monitoramento possibilitado pela internet das coisas. Para finalizar temos a ação “Trocar” que pode ser otimizada pela manufatura aditiva, impressão 3D e internet das coisas, que promovem a diminuição da utilização de material (JABBOUR et al., 2018).

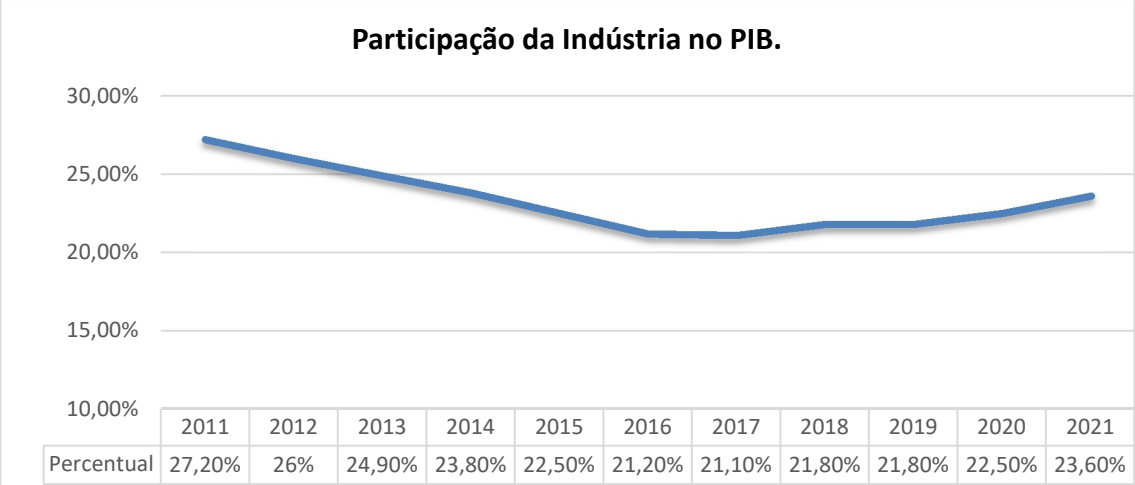
1.3 Indústria brasileira.

Os dados mais recentes encontrados sobre o número de estabelecimentos industriais no Brasil são de 2021 e podem ser encontrados no portal do CNI (Confederação Nacional das Indústrias), que indica que nesse período o Brasil atingiu o número de 490.286(quatrocentos e noventa mil, duzentos e oitenta e seis) estabelecimentos. Aproximadamente 50% dessas indústrias estão distribuídas em apenas três estados, São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Sul. São Paulo é o líder do Ranking com aproximadamente 28% do total, o que corresponde à mais de um quarto das indústrias brasileiras (CNI,2022)

De acordo com o porte, temos a seguinte distribuição, 93,70% das indústrias são representadas por micro e pequenas empresas (1 a 49 empregados), 5,1 % por médias empresas (50 a 249 empregados) e apenas 1,2% por grandes empresas (250 ou mais empregados), esta classificação com relação ao porte das empresas, segue o padrão Eurostat, que é o órgão oficial de estatísticas da União Europeia. Com relação à distribuição por porte de estabelecimento da produção da indústria geral, a atualização dos dados é referente ao ano de 2020 e temos que as grandes empresas absorvem 76,7% da produção, as médias empresas chegam a 13,2% e as micro e pequenas empresas atingem 10%. A indústria geral considera apenas indústria extrativa (responsável pela extração de matérias-primas) e indústria de transformação (sistemas de produção que transformam uma matéria-prima em um bem), excluindo a Indústria de construção e os SIUP (serviços industriais de utilidade pública, que se referem a serviços industriais de uso comum, como por exemplo eletricidade e água (CNI,2022)

A indústria brasileira, ainda segundo informações encontradas no portal da (CNI), no ano de 2021, ocupou o segundo lugar em participação no PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro, se comparado às demais atividades econômicas, alcançando 23,6% de participação no PIB nacional. Este índice vem apresentando um leve crescimento ao longo dos últimos anos, alcançando em 2021 uma participação de 23,60% (CNI,2022,) como podemos ver no gráfico presente na figura 6.

Figura 6: Participação da Indústria no PIB brasileiro.



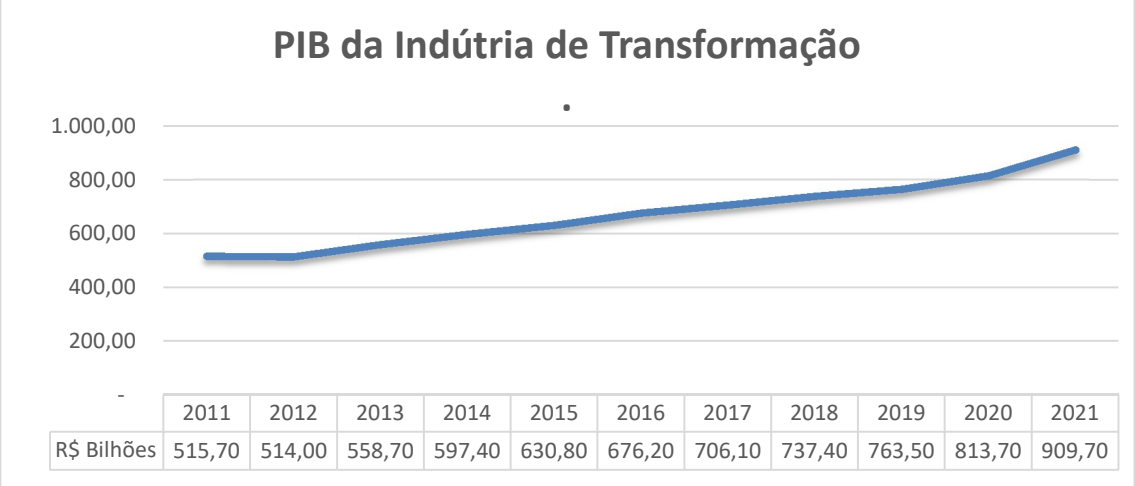
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Percentual	27,20%	26%	24,90%	23,80%	22,50%	21,20%	21,10%	21,80%	21,80%	22,50%	23,60%

Fonte: Elaborado pela autora com base nas informações do portal do CNI (2022)

Perfil da Indústria de Transformação.

No portal do CNI, também podemos encontrar os dados referentes apenas à indústria de transformação, que alcança sozinha 12% de participação no PIB nacional e cerca 50,7% de toda participação industrial. O PIB da indústria de transformação evoluiu de forma crescente ao longo dos últimos anos, com queda pontual no ano de 2012 (CNI,2022), como podemos ver no gráfico da figura 7.

Figura 7: PIB da Indústria de transformação.

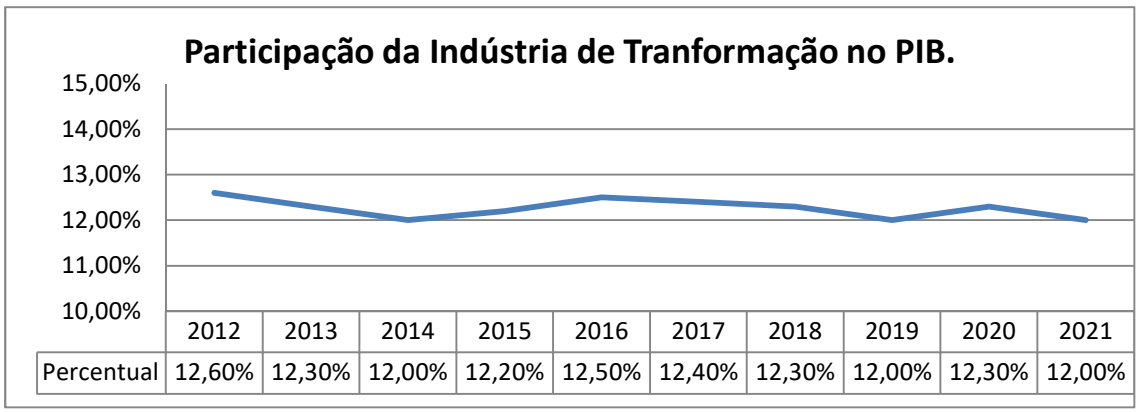


	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
R$ Bilhões	515,70	514,00	558,70	597,40	630,80	676,20	706,10	737,40	763,50	813,70	909,70

Fonte: Elaborado pela autora com base nas informações do portal do CNI (2022).

Apesar do crescimento em seu PIB, o PIB da indústria de transformação se mantém estável em relação a sua participação no PIB nacional como podemos ver no gráfico da figura 8.

Figura 8: Participação da Indústria de transformação do PIB.

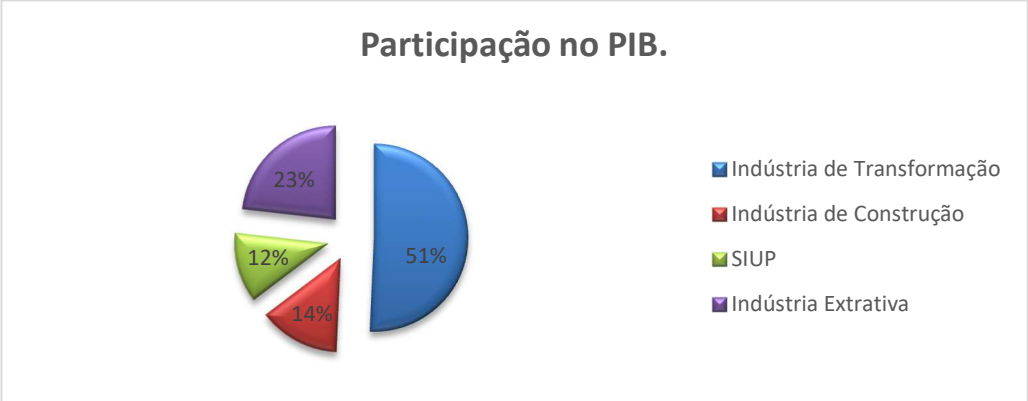


	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Percentual	12,60%	12,30%	12,00%	12,20%	12,50%	12,40%	12,30%	12,00%	12,30%	12,00%

Fonte: Elaborado pela autora com base nas informações do portal do CNI (2022).

No ano de 2021, a indústria de transformação ocupou o primeiro lugar em participação no PIB geral da indústria brasileira se comparado aos demais segmentos da indústria, alcançando 50,7% do total, a participação dos outros três segmentos considerados, que são indústria de construção, serviços industriais de utilidade pública e indústria extrativa, somados, não alcançam esta participação, chegando aos 49,3%(CNI,2022), como podemos ver ilustrado no gráfico da figura 9.

Figura 9: Participação dos setores industriais no PIB.



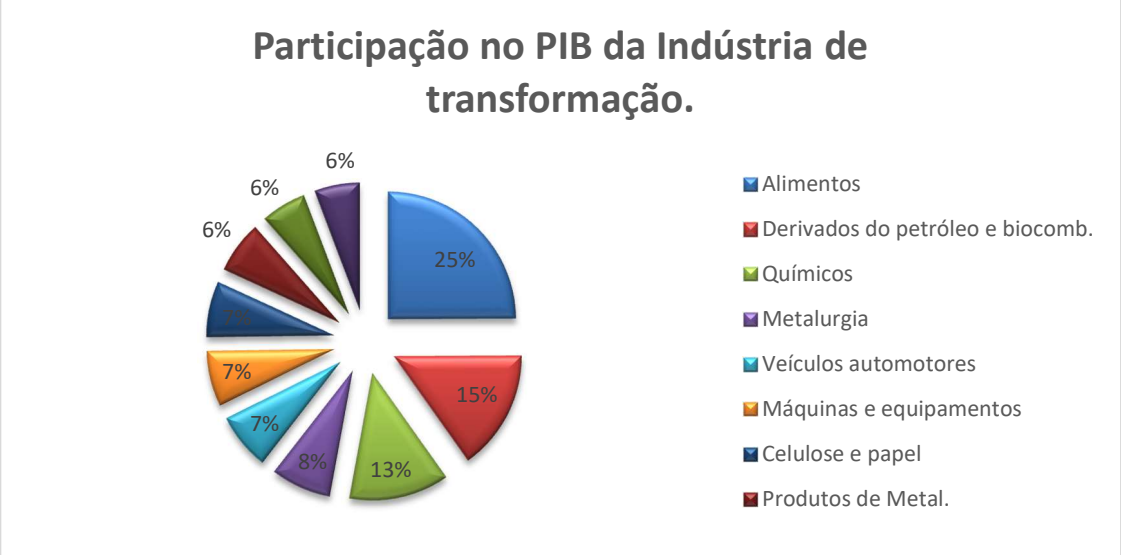
Fonte: Elaborado pela autora com base nas informações do portal do CNI (2022).

Segundo os dados referentes ao ano de 2021, última atualização encontrada do portal da indústria, ao que se refere a distribuição das empresas por porte, na

segmentação da indústria de transformação, a grande maioria das empresas, que representam 92,8%, são micro e pequenas empresas, 5,7% são médias empresas e apenas 1,5% são grandes empresas (CNI,2022)

O setor de alimentos lidera o ranking com 17,3% de participação, seguido pelo setor de derivados do petróleo e biocombustíveis que alcança cerca de 10,60%. A distribuição geral da participação se refere ao ano de 2020, última atualização disponível (CNI, 2022) e está ilustrada no gráfico presente na figura 10.

Figura 10: Participação dos setores industriais no PIB da indústria de transformação.



Fonte: Elaborado pela autora com base nas informações do portal do CNI (2022).

1.3.1 Indústria 4.0 no Brasil.

O Brasil, atualmente ocupa a 54º posição no ranking do índice global de inovação, elaborado pela WIPO *(Word Intelectual Property Organization*). O índice de 2022 fornece informações sobre 132 países. Apesar de o País ter avançado algumas posições ao longo dos últimos anos, ainda está muitos distante da posição das Grandes economias mundiais (WIPO,2022)

O investimento industrial em P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) da indústria vinha sendo crescente no período compreendido entre os anos de 2016 e 2019, no entanto apresentou uma queda entre os anos de 2019 e 2020, tanto na indústria geral, quanto na indústria de transformação. Os dados mais recentes encontrados no portal da indústria são de 2020 e indicam um investimento empresarial de quase 15 milhões de

reais para indústria geral e aproximadamente 14 milhões são destinados a indústria de transformação que alcança a marca de 94,21% do total geral do investimento na indústria.

A CNI (Confederação Nacional da Indústria), divulgou no ano de 2020, uma pesquisa intitulada “A difusão das tecnologias da indústria 4.0 em empresas brasileiras”. A pesquisa foi realizada com empresas brasileiras que já haviam realizado algum investimento referente à indústria 4.0 e a partir dessas entrevistas se chegou as principais motivações e restrições para a adoção da indústria 4.0 no Brasil.

Segundo a pesquisa realizada pelo CNI, as principais motivações que foram constatadas nas indústrias brasileiras para a introdução de inovações trazidas pela indústria 4.0, são o aumento de produtividade e redução dos custos de manutenção. No caso o aumento de produtividade gerado, pelo controle de funcionamento das máquinas, que só recebem manutenção quando realmente é necessário, evitando paradas desnecessárias, o que consequentemente também reduz o custo de produção e manutenção. Algumas empresas também adotaram a impressão 3D, para produzir as peças que são utilizadas na manutenção das máquinas, reduzindo ainda mais o custo de manutenção (CNI,2020)

Outras motivações mencionadas foram o controle mais eficiente de produção visando a redução no consumo de energia e outros insumos industriais, na área de logística, a modernização nos processos de carga e descarga e no caso de empresas multinacionais, a integração à corporação empresarial, determinada externamente.

No que se refere às restrições para introdução de projetos de inovação trazidos pela indústria 4.0, a pesquisa realizada pelo CNI constatou, que a falta de informação sobre as novas tecnologias é um grande limitante, essa falta de informação ocorre nos níveis operacional, executivo e gerencial. Em muitos casos os executivos das empresas brasileiras acreditam que a indústria 4.0 não passa de um modismo e preferem investir em outros projetos. A falta de conhecimento também foi identificada no nível gerencial. As gerências não estão capacitadas e por consequência não conseguem influenciar o nível executivo na tomada de decisão referente a esse novo desafio. No nível operacional, faltam informações para que os trabalhadores não se coloquem de forma contrária aos novos projetos e também iniciativas para que se busque requalificação para se adaptar as novas tecnologias (CNI,2020).

A restrição de recursos para investimento, também se coloca como uma forte restrição. As empresas pesquisadas sentem falta de instrumentos de financiamento voltados para a adoção das tecnologias voltadas para os novos projetos da indústria 4.0. com taxas de juros reduzidas, que impulsionem esse movimento, pois diante de um atraso

tecnológico há uma grande demanda por recursos (CNI,2020).

2 Metodologia.

Este capítulo trata dos métodos de trabalho que serão utilizados nesta dissertação. A pesquisa passa pelas etapas de planejamento, execução e análise das evidências descobertas. Na fase de planejamento são definidos a classificação e o método de pesquisa. Já a fase de execução é composta inicialmente por uma pesquisa bibliográfica exploratória sobre os temas indústria 4.0, sustentabilidade e sobre a indústria brasileira, seguido por uma revisão sistemática da literatura que busca identificar quais são os possíveis impactos relacionados a sustentabilidade ambiental ocasionados pela adoção das tecnologias referentes à indústria 4.0. Por fim foi realizada uma pesquisa de campo, para identificar quais foram os resultados referentes a sustentabilidade ambiental, alcançados pelas empresas que fizeram a implantação da indústria 4.0 no Brasil. A etapa final de Análise engloba a discussão dos resultados e as conclusões do estudo.

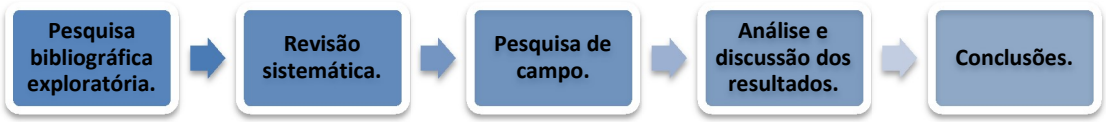
2.1 Planejamento da pesquisa.

De acordo com Gil (2002), o planejamento se apresenta como a primeira fase de toda pesquisa e toda pesquisa exige que ao longo de seu processo que suas atividades sejam efetivamente planejadas. O autor define o planejamento da pesquisa como um processo sistematizado por meio do qual pode-se conferir maior eficiência a uma investigação para que num prazo determinado se possa alcançar um conjunto de metas estabelecidas.

Considerando a teoria defendida por Gil (2008) esta pesquisa de dissertação trata-se de uma pesquisa exploratória, que apresenta como principal objetivo proporcionar uma visão geral, aproximativa, acerca de um determinado fato. Normalmente este tipo de pesquisa é aplicado quando o tema selecionado é pouco explorado, existindo grande dificuldade em formular hipóteses precisas e operacionalizáveis, como no objeto de estudo em questão. O estudo adota uma abordagem qualitativa, que segundo Godoy (1995), é a forma de se compreender melhor um fenômeno, dentro do contexto em que ele ocorre, onde o pesquisador vai a campo numa tentativa de captar, a partir da perspectiva das pessoas envolvidas, o fenômeno em estudo, considerando diversos pontos de vista relevantes e coletando e analisando os vários tipos de dados coletados

para assim entender a dinâmica do fenômeno pesquisado. O planejamento se estruturou conforme o fluxograma da figura 11:

Figura 11: Fluxograma de planejamento da pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora.

2.2 Pesquisa Bibliográfica Exploratória.

A pesquisa bibliográfica se desenvolve baseando-se no material já elaborado, em sua maioria livros e artigos científicos, como afirma GIL (2002) e tem como objetivo o conhecimento das contribuições científicas já atribuídas a um determinado assunto. (JUNG, 2004). A pesquisa bibliográfica sobre os temas indústria 4.0, sustentabilidade e sobre a indústria brasileira, foi realizada através da consulta das bases de dados *Web of Science, Scopus e Scielo*. Além das bases de dados citadas, também foi utilizado o portal da CNI, para obter dados atuais sobre a indústria brasileira. O material encontrado foi utilizado como base para elaboração do referencial teórico deste estudo.

2.3 Revisão Sistemática de literatura.

Trata-se de uma investigação focada numa questão bem definida, visando identificar, avaliar, e sintetizar as evidências relevantes já disponíveis. As revisões sistemáticas devem ser abrangentes e não tendenciosas, tendo os critérios utilizados divulgados, para que outros pesquisadores consigam replicar o procedimento. Quando consideradas de boa qualidade são consideradas como melhor nível de evidências para a tomada de decisão. São previstos como método para a elaboração de uma revisão sistemática, a elaboração da pergunta de pesquisa, a busca na literatura, seleção dos

artigos, extração dos dados, avaliação da qualidade metodológica, síntese dos dados (metanálise), avaliação da qualidade das evidências e redação e publicação dos resultados (GALVÃO *et al.*, 2014).

Pergunta orientadora da pesquisa.

Para realizar a pesquisa por estudos nas bases de dados, se faz necessária a elaboração de uma pergunta orientadora para a pesquisa. A questão elaborada para ser utilizada como base foi “Quais os impactos a adoção da indústria 4.0 pode causar na sustentabilidade ambiental das empresas?”. Para encontrar estudos que possam responder a esse questionamento, foi utilizado o cruzamento dos termos “Industry 4.0” e “environmental sustainability”, porém devido ao retorno de poucos estudos, foi realizado uma nova consulta utilizando os termos “Industry 4.0” e “sustainability”, alcançando assim um número de estudos considerado satisfatório pela autora.

Base de dados investigadas.

Para o levantamento de estudos publicados sobre o tema, foram selecionadas as seguintes bases de dados; *Web of Science, Scopus e Scielo*, consideradas referências mundiais. A busca foi realizada através do acesso CAFE (Comunidade Acadêmica Federada) disponível no Portal de Periódicos CAPES/MEC. A busca pelos estudos foi realizada no dia 27/06/2022.

Critérios de Inclusão e Exclusão.

A exclusão ou inclusão dos estudos encontrados foi realizada com base nos seguintes critérios:

a) Publicações anteriores ao ano de 2011: Foram excluídos todos os estudos publicados anteriormente ao de 2011, ano de surgimento do termo indústria 4.0. Desta forma é possível excluir parte dos estudos que falem apenas de sustentabilidade, sem considerar os efeitos da indústria 4.0.
b) Materiais que não sejam artigos científicos: Por apresentarem um processo rigoroso para a aprovação da publicação, apenas artigos científicos foram considerados, excluindo o restante do material.
c) Acesso aberto: Foram eliminados todo os artigos de acesso fechado.

d) Duplicatas: Foi eliminado todo o material em duplicidade nas bases.

Análise dos artigos elegíveis.

Para a seleção final dos artigos, foi realizada uma triagem onde os estudos passaram por uma análise de título e resumo, para identificar a proximidade do material com o tema escolhido e eliminar os estudos que possuam um direcionamento distinto do presente estudo. Não se pode deixar de destacar que esta etapa é subjetiva, o que não anula a possibilidade de que algum estudo excluído possa ser relevante para o tema. Após esta etapa o restante dos artigos será lido na íntegra e apenas os estudos que realmente se aproximam da temática pesquisada serão incluídos neste estudo.

2.4 Pesquisa de Campo.

De acordo com Gil (2002), num estudo de campo, não há como definir um padrão de etapas a ser seguido em todas as pesquisas, tendo em vista que a especificidade de cada estudo tende a requerer seus próprios procedimentos, porém existem algumas etapas que podem ser vistas na maioria dos estudos inseridos nesta classificação, tais como:

a. Elaboração do projeto inicial;
b. Exploração preliminar;
c. Formulação do projeto de pesquisa;
d. Pré-teste dos instrumentos e procedimentos de pesquisa;
e. Coleta de dados;
f. Análise do material;
g. Redação do relatório.

A pesquisa de campo presente nesta dissertação, tendo como base as etapas enumeradas acima foi elaborado da seguinte forma:

a. Elaboração do projeto;
b. Teste do instrumento de pesquisa;
c. Coleta de dados;
d. Extração e análise dos resultados.

2.4.1 Elaboração do projeto.

Esta etapa foi iniciada por uma investigação de quais seriam as necessidades da pesquisa, o público-alvo, quais pontos precisavam ser abordados durante a coleta de dados e qual seria o instrumento de pesquisa, diante disso foi elaborado o projeto a seguir:

O principal objetivo da pesquisa de campo era investigar quais eram os resultados reais, ligados a sustentabilidade ambiental, que foram alcançados pelas empresas que implantaram as tecnologias referentes a indústria 4.0.

Público – alvo: Para alcançar o objetivo traçado, a pesquisa só poderia ser realizada em empresas que já estivessem utilizando tais tecnologias e o respondente precisaria necessariamente ter acesso direto aos resultados. Para alcançar tal perfil, foram utilizadas diversas formas de abordagem. Inicialmente foi realizada uma busca na internet por empresas que divulgaram algum tipo de ligação com a indústria 4.0. Através desta listagem de empresas foi realizada uma busca na plataforma LinkedIn, que segundo a mesma possui a maior rede profissional do mundo e conta com mais de 850 milhões de usuários. Através da plataforma, foi possível identificar profissionais que trabalhavam diretamente com indústria 4.0. Além do LinkedIn, também foi utilizado o aplicativo de mensagens Telegram, através do grupo “WF- Indústria 4.0”, que foi criado em outubro de 2020, para a troca de informações entre profissionais ligados a indústria 4.0, atualmente o grupo conta com 470 membros.

Principais pontos a serem abordados: Para que a pesquisa fosse bem-sucedida e conseguisse trazer informações relevantes foi considerada essencial a abordagem dos seguintes pontos:

I. Informações básicas sobre a empresa e sobre o respondente.
II. Informações sobre a implantação.
III. Identificação das tecnologias utilizadas.
IV. Informações Resultados alcançados.

Elaboração do instrumento de pesquisa: O instrumento escolhido para a coleta de

dados da pesquisa foi um questionário. Este questionário foi elaborado com base tanto nas informações obtidas na pesquisa bibliográfica quantos nos resultados obtidos na revisão sistemática. As questões desenvolvidas foram inseridas no aplicativo de gerenciamento de pesquisas “Google Forms”, que além de permitir a coleta de dados oferece em sua plataforma opções de gerenciamento para os mesmos. O resumo das questões que o compõe estão presentes no quadro 3 abaixo, assim como os objetivos pelos quais foram utilizadas.

Quadro 3: Resumo das questões elaboradas para o questionário piloto.

Questões		Objetivos
1	Nome da Empresa:	Identificação da empresa
2	A empresa pertence a qual setor industrial?	
3	Cargo Ocupado pelo entrevistado:	Elegibilidade
4	Autorização para divulgação dos dados da empresa:	
5	Há quanto tempo a empresa começou a utilizar as tecnologias referentes a indústria 4.0?	Informações sobre a implantação
6	Qual foi a maior motivação da empresa para iniciar a implantação das tecnologias referentes a indústria 4.0?	
7	Quais eram os principais objetivos com a implantação?	
8	Quais das tecnologias abaixo estão sendo utilizadas pela empresa?	Identificação das tecnologias
9	Após a implantação das novas tecnologias, em qual dimensão da sustentabilidade foi possível observar um melhor resultado?	Informações sobre os resultados alcançados
10	Assinale os impactos ambientais que puderam ser observados após a implantação das tecnologias 4.0 em sua empresa	
11	Relacione os impactos citados anteriormente com as tecnologias utilizadas pela empresa:	
12	Quais fatores a empresa considera que foram fundamentais para que os resultados referentes a sustentabilidade ambiental fossem alcançados?	
13	Quais fatores a empresa considera que foram uma barreira para o alcance desses resultados?	

Fonte: Elaborado pela autora.

As questões “4,5,6,8,9,10 e 11” são de múltipla escolha e suas opções de respostas foram suprimidas do quadro para uma melhor visualização. O questionário completo encontra-se nos apêndices desta dissertação.

2.4.2 Teste do Instrumento de pesquisa.

A fim de se verificar a funcionalidade do questionário elaborado (AnexoI), o mesmo foi testado. O teste foi realizado através do envio do formulário elaborado no “google forms” para um entrevistado voluntário e após a avaliação das respostas recebidas juntamente com o feedback do voluntário foram realizadas apenas duas alterações. As questões “1” e “4” foram retiradas do questionário, pois a identificação do nome da empresa esbarra em questões legais e burocráticas que poderiam levar a uma recusa na participação de algumas empresas, reduzindo o número de participantes. O nome da empresa só seria utilizado para o controle da autora da pesquisa, logo a retirada destas questões, não trouxeram um impacto significativo no resultado final da pesquisa.

2.4.3 Coleta de dados.

A coleta de dados se deu através do envio do link do questionário produzido no google forms (Anexo II). O link foi enviado tanto para o grupo “WF- Indústria 4.0” no aplicativo Telegram, quanto para os participantes em potencial identificados na plataforma LinkedIn, que receberam previamente ao envio do questionário um convite explicativo para a participação da pesquisa. O formulário foi enviado para um total de 500 pessoas considerando o aplicativo e a plataforma utilizados e ficou disponível para o recebimento de resposta no período de 20/10/2022 a 20/11/2022.

2.4.4 Extração e análise dos resultados.

Após o encerramento do período de coleta de dados, as respostas dos entrevistados foram compiladas e analisados dando origem a seção 4.2 desta dissertação.

3 Resultados.

3.1 Revisão Sistemática.

Como resultado do levantamento onde foram utilizados os termos *"Industry 4.0*" e *"Sustainability"* nas bases de dados escolhidas, temos o retorno de um total de 2534 estudos. Logo após foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão adotados e obtivemos os seguintes resultados: No critério "publicações anteriores ao ano de 2011", não foi excluído nenhum artigo, pois só foram encontradas publicações nas bases *Web os Science e Scopus* a partir dos ano de 2014, no critério "materiais que não sejam artigos científicos", foram excluídos 1087 estudos, no critério "acesso aberto" foram excluídos 533 artigos, no critério "duplicatas" foram excluídos 77 artigos que estavam duplicados nas bases, restando 837 artigos para a análise de título e resumo. Após a análise de título e resumo restaram 76 artigos para a fase de análise de elegibilidade. Nesta fase todos os artigos foram lidos na íntegra para chegar ao número final de 13 artigos incluídos no estudo. O fluxograma presente na figura 12 ilustra o processo de seleção.

Figura 12: Fluxograma do processo de seleção dos estudos.



Fonte: Elaborado pela autora.

O quadro 4 abaixo traz a identificação dos estudos selecionados para a presente pesquisa.

Quadro 4: Identificação dos estudos selecionados.

Número de identificação	Autores	Título
1	Waibel *et al.* (2017)	Investigating the Effects of Smart Production Systems on Sustainability Elements
2	Müller *et al.* (2018)	Sustainable Industrial Value Creation in SMEs: a comparison between industry 4.0 and made in china 2025
3	Bonilla *et al.* (2018)	Industry 4.0 and Sustainability Implications: a scenario-based analysis of the impacts and challenges.
4	Müller *et al.* (2018)	What Drives the Implementation of Industry 4.0? The Role of Opportunities and Challenges in the Context of Sustainability
5	Birkel *et al.* (2019)	Development of a Risk Framework for Industry 4.0 in the Context of Sustainability for Established Manufacturers.
6	Braccini *et al.* (2018)	Exploring Organizational Sustainability of Industry 4.0 under the Triple Bottom Line: the case of a manufacturing company.
7	Varela *et al.* (2019)	Evaluation of the Relation between Lean Manufacturing, Industry 4.0, and Sustainability.
8	Ivascu *et al.* (2020)	Measuring the Implications of Sustainable Manufacturing in the Context of Industry 4.0.
9	Ahmad *et al.* (2020)	Towards Sustainable Textile and Apparel Industry: exploring the role of business intelligence systems in the era of industry 4.0.
10	Sartal *et al.* (2020)	The sustainable manufacturing concept, evolution and opportunities within Industry 4.0: a literature review.
11	Felsberger *et al.* (2020)	The impact of Industry 4.0 on the reconciliation of dynamic capabilities: evidence from the european manufacturing industries
12	Hughes *et al.* (2020)	Perspectives on the future of manufacturing within the Industry 4.0

13	Bai *et al.* (2020)	Industry 4.0 technologies assessment: a sustainability perspective

Fonte: Elaborado pela autora.

3.1.1 Impactos da Indústria 4.0 na Sustentabilidade Ambiental.

Com base na leitura dos artigos selecionados para compor a pesquisa serão apresentados nesta sessão os impactos da implantação da indústria 4.0 na sustentabilidade ambiental. Serão considerados tantos os impactos esperados, que já foram elencados na pesquisa existente, quanto os impactos já comprovados através de estudos de caso já publicados sobre o tema.

O estudo de Waibel *et al.* (2017), fala sobre os efeitos dos sistemas de produção inteligentes nos elementos de sustentabilidade e aponta a redução de desperdício, da superprodução e do consumo de energia como principais consequências da utilização das tecnologias referentes a Indústria 4.0. Este resultado provém do maior controle sobre a matéria-prima que é solicitado apenas sob demanda, além da produção que é organizada para produzir somente o necessário.

Müller *et al.* (2018), em sua pesquisa que fala sobre a criação de valor industrial sustentável, cita como benefícios trazidos pela Indústria 4.0 a redução do consumo de energia, devido a possibilidade do agendamento inteligente de tarefas e processos; uma melhor gestão do ciclo de vida dos produtos, incluindo a reciclagem; a redução de emissão de gases de efeito estufa e de consumo de recursos e geração de resíduos.

Bonilla *et al.* (2018), salientam as oportunidades e efeitos referentes a sustentabilidade ambiental trazidas pela implantação das tecnologias 4.0. Dentre os efeitos são citados, a diminuição do fluxo de energia, a maior utilização de energia renovável, redução do fluxo de materiais e resíduos e redução da emissão de gases de efeito estufa, que podem ser alcançados através da utilização de diversas tecnologias como a *IoT,* análise de *Big Data, blockchain* entre outras.

No estudo que trata sobre as oportunidades e desafios trazidos pela Indústria 4.0, Müller *et al.* (2018), destaca a redução das emissões de gases de efeito estufa, do desperdício de recursos e de energia, como oportunidades referentes a sustentabilidade ambiental ocasionadas pela adoção das tecnologias estudadas.

Como consequência da implementação das novas tecnologias, Birkel *et al*. (2019), indica a redução do consumo de energia, através da otimização e simulação

de processos e gerenciamento inteligente da energia, o melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto e dos processos de reciclagem, ocasionando assim um menor consumo de recursos e redução do desperdício, que também é consequência do fluxo desnecessário de materiais. Além disso também é citado a redução de emissão de gases de efeito e estufa e consequentemente da pegada de CO2 das empresas.

Braccini *et al.* (2018) destaca a redução do uso de recursos naturais como o maior benefício relacionado a perspectiva ambiental da sustentabilidade, dando destaque para a redução do consumo de energia, também citam a redução no consumo de água e na emissão de CO2. Os autores ainda apontam a diminuição do desperdício de matéria-prima e da geração de resíduos.

No estudo de Varela *et al.* (2019), podemos encontrar como contribuições referentes a influência da indústria 4.0 na dimensão ambiental da sustentabilidade a diminuição do lixo industrial, do consumo de energia e da utilização de fontes de energia não renováveis, do consumo de recursos e de fatores que influenciam no aquecimento global.

A pesquisa de Ivascu *et al.* (2020), que trata sobre manufatura sustentável, identifica como benefícios decorrentes da utilização das tecnologias 4.0, a redução de perdas e de consumo de recursos e também na quantidade de resíduos e gases de efeito estufa gerados.

A visão oferecida pelo estudo de Ahmad *et al.* (2020) sobre os benefícios ambientais causados pelo uso das tecnologias estudadas é focada no gerenciamento do estoque. Através do maior controle de demanda temos por consequência a diminuição do consumo e do desperdício de materiais.

Sartal *et al.* (2020), salienta como resultado da implementação das tecnologias 4.0, a diminuição da geração de resíduos e utilização de energia, bem como das perdas de matérias que são gerados ao longo de todo o processo de produção, devido a interligação de dados e da maior transparência em toda gestão da cadeia de abastecimento.

No estudo de Felsberger *et al*. (2020), são evidenciados como impactos ambientais decorrentes da indústria 4.0 a economia de energia, alcançada de diversas formas como por exemplo a resultante do aprimoramento e automação dos processos de toda a empresa, menos retrabalho, iluminação mais eficaz e redução do número de máquinas, além disso, a redução do desperdício de recursos, através da utilização mais eficiente dos materiais.

O estudo de Hughes *et al.* (2020) também destaca a economia de energia e a

diminuição do desperdício, que é alcançado através da racionalização da cadeia de suprimentos

Em sua pesquisa, Bai *et al.* (2020), destacam alguns resultados encontrados pela utilização das tecnologias da Indústria 4.0. Na indústria automotiva, através da utilização da nanotecnologia, pôde-se observar a redução de consumo de combustível, das emissões de CO_2 realizadas por veículos e na utilização de plásticos derivados do petróleo. Na indústria de alimentos e bebidas, têxteis, vestuário e calçados a tecnologia de simulação se destacou, resultando na diminuição do consumo de água. A tecnologia de nuvem impacta na maior eficiência no uso dos materiais, na redução no uso de materiais tóxicos.

A partir dos resultados encontrados foi gerado o Quadro 5, que evidencia a frequência em que os impactos encontrados se repetem nos estudos analisados. Podemos então observar que a "redução do consumo e/ou no desperdício de recursos", foi o único impacto observado em todos os estudos, seguido da "redução do consumo de energia, presente em nove dos estudos o que representa quase 70% do total e da "redução da emissão de gases de efeito estufa", que está presente em aproximadamente 50% dos estudos. Os demais impactos aparecem em menor frequência.

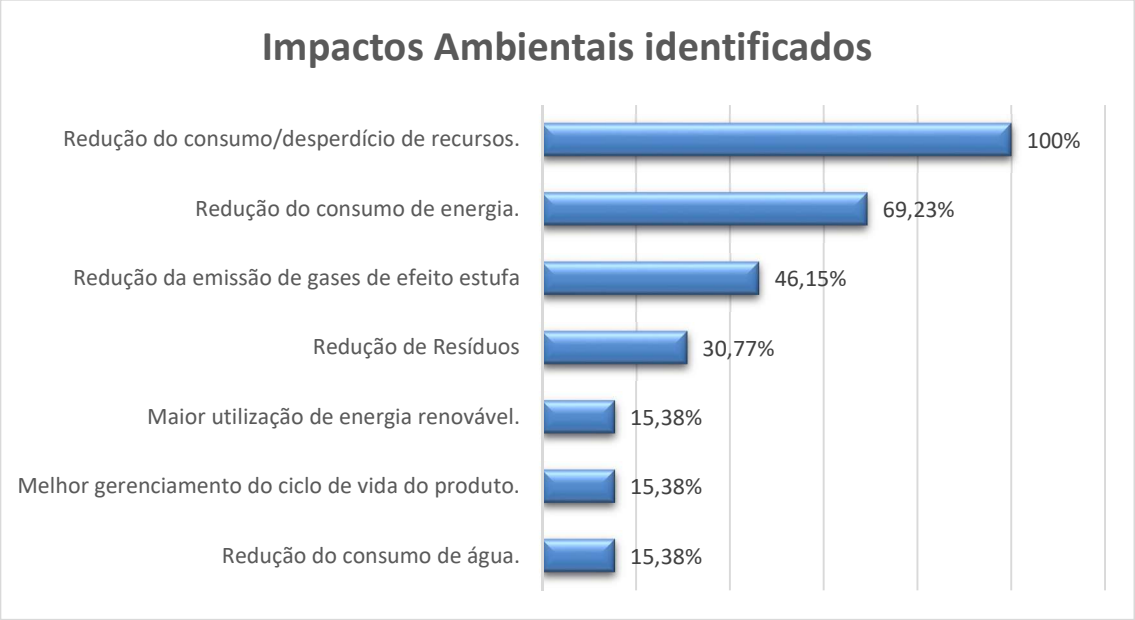
Quadro 5: Frequência de ocorrência dos impactos.

Impactos Ambientais	**Identificação dos Estudos**													
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**Total**
Redução do consumo/desperdício de recurso	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	**13**
Redução do consumo de energia	x	x		x	x	x	x			x	x	x		**9**
Redução da emissão de gases de efeito estufa		x	x	x		x		x					x	**6**
Redução de Resíduos		x				x	x		x					**4**
Maior utilização de energia renovável			x				x							**2**
Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto		x			x									**2**
Redução do consumo de água						x							x	**2**

Fonte: Elaborado pela autora.

No gráfico presente na figura 13, podemos visualizar como a “Redução do consumo/desperdício de recursos”, a “Redução do consumo de energia” e a “Redução da emissão de gases de efeito estufa”, se destacaram dentre os demais impactos que foram identificados, se tornado os resultados mais esperados com a implantação.

Figura 13: Impactos ambientais identificados na literatura.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2 Pesquisa de Campo.

Após o período total de divulgação do questionário da pesquisa, obteve-se um total de 13 respondentes. Para cada respondente foi atribuído um número, que vai do número “1” ao “13” para melhor identificação e visualização dos resultados. Os resultados obtidos através do conjunto de perguntas aplicadas, serão descritos abaixo:

3.2.1 Perfil dos Respondentes:

Para que todas as respostas da pesquisa fossem obtidas com êxito se fez necessário que o respondente tivesse acesso aos dados referentes aos resultados da implantação das tecnologias 4.0. Este tipo de informação, é comumente obtida por ocupantes de cargos técnicos específicos ou cargos gerenciais. Os cargos dos participantes estão descritos abaixo no quadro 6:

Quadro 6: Descrição de cargos.

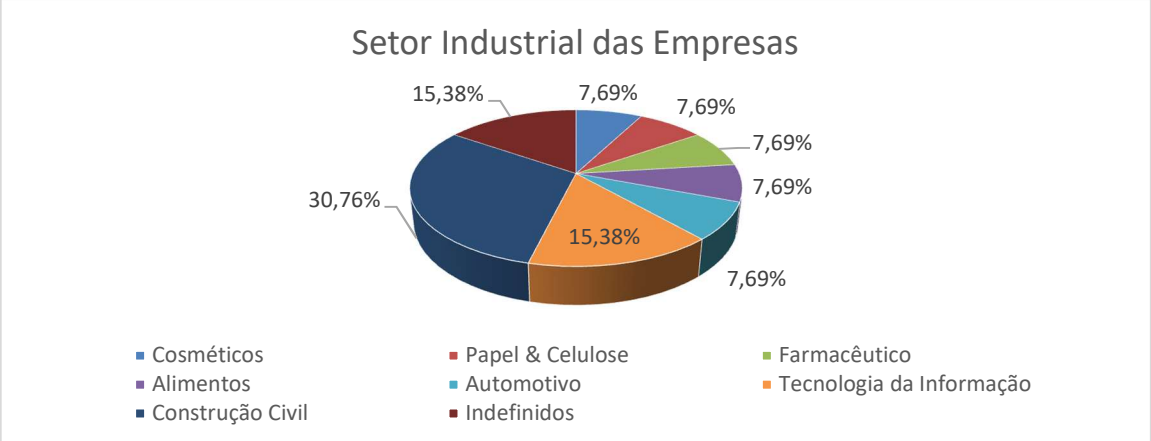
Empresa	Cargo do Respondente
1	Plant Manager
2	Supervisor de Automação
3	Supervisor de manutenção industrial
4	Analista de sistemas para indústria 4.0
5	Engenheiro de software
6	Assessor CEO
7	Técnico
8	Gerente
9	Coordenador de Projetos
10	Técnico em Elétrica
11	Gerente Sênior
12	Gerente geral de Indústria 4.0
13	Coordenador Corporativo Indústria 4.0

Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.2 Perfil das empresas respondentes:

Os resultados indicam uma distribuição bem diversificada no que diz respeito a distribuição dos participantes por setor industrial. O setor dominante é o de construção civil, que possui um total de 30,76% dos respondentes, seguido pelo setor de tecnologia da informação com 15,38%. Os demais setores representados são os de cosméticos, papel e celuose, farmacêutico, alimentos e automotivo alcançaram o mesmo percentual de participação que corresponde a 7,69%. Dois participantes deram respostas que foram consideradas como indefinidas por não deixarem claro setor da empresa. A dsitribuição das empresas está representada abaixo no gráfico presente na figura 14.

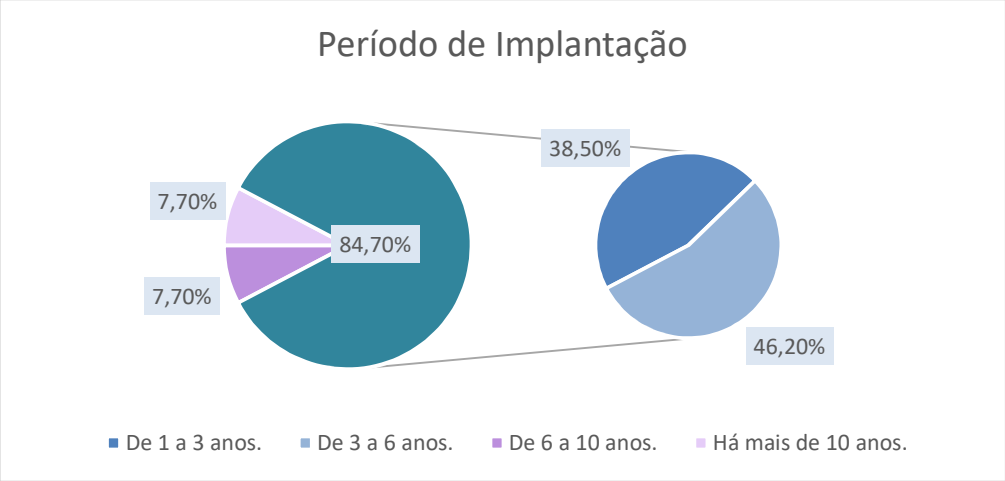
Figura 14: Setor Industrial das empresas participantes.



Fonte: Elaborado pela autora.

Com relação ao tempo de implantação das tecnologias referentes a indústria 4.0, a maioria das empresas, cerca de 46,2%, declarou estar utilizando as tecnologias num intervalo de 3 a 6 anos, seguido por um percentual de 38,5% dos participantes que diz ter feito a implantação num período entre 1 e 3 anos. Apenas 7,7 % declararam ter implantado as tecnologias entre 6 e 10 anos, mesmo percentual alcançado pelas empresas que implantaram num período superior a 10 anos. A distribuição percentual das empresas de acordo com o período de implantação está representada no gráfico da figura 15, onde podemos observar que a grande maioria, aproximadamente 85% das empresas entrevistadas, realizou sua implantação no período de 1 a 6 anos.

Figura 15: Distribuição (%) das empresas por período de implantação.



Fonte: Elaborado pela autora.

No quadro 7 abaixo podemos observar o período de implantação declarado por cada empresa participante de forma individual.

Quadro 7: Período de implantação.

Empresa	Período de Implantação
1	De 3 a 6 anos.
2	Há mais de 10 anos.
3	De 1 a 3 anos.
4	De 1 a 3 anos.
5	De 3 a 6 anos.
6	De 3 a 6 anos.
7	De 1 a 3 anos.
8	De 3 a 6 anos.
9	De 3 a 6 anos.
10	De 1 a 3 anos.

11	De 3 a 6 anos.
12	De 6 a 10 anos.
13	De 1 a 3 anos.

Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.3 Objetivos da Implantação.

Quando perguntados sobre qual era a motivação da empresa em adotar as novas tecnologias referentes a indústria 4.0 num contexto de sustentabilidade, aproximadamente 85% dos respondentes elegeram a sustentabilidade econômica como a maior motivação para o início da implantação, contrastando com os aproximadamente 15% que indicara a sustentabilidade ambiental como principal fator de motivação. Nenhuma empresa declarou ter a sustentabilidade social como motivação. Como podemos ver no quadro 8, somente as empresas 2 e 3 tiveram a questão ambiental como prioridade na implantação.

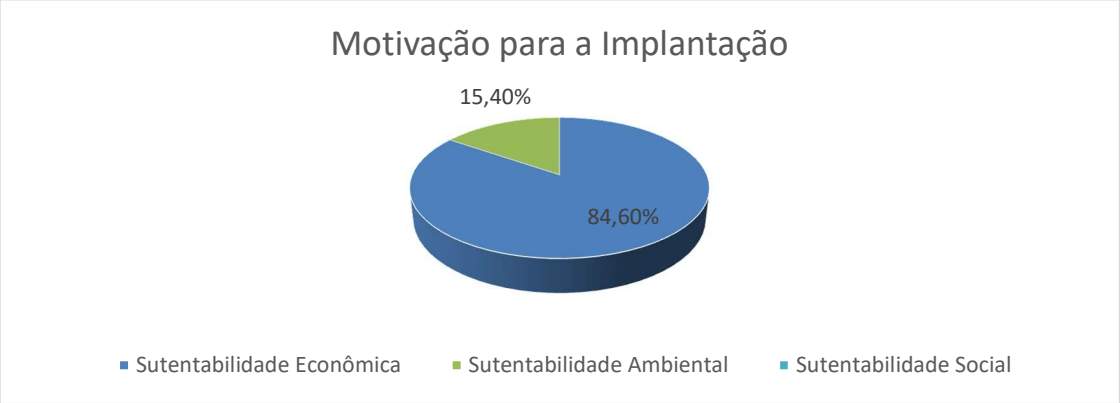
Quadro 8: Motivação para implantação.

Empresa	Motivação para implantação
1	Sutentabilidade Econômica
2	Sutentabilidade Ambiental
3	Sutentabilidade Ambiental
4	Sutentabilidade Econômica
5	Sutentabilidade Econômica
6	Sutentabilidade Econômica
7	Sutentabilidade Econômica
8	Sutentabilidade Econômica
9	Sutentabilidade Econômica
10	Sutentabilidade Econômica
11	Sutentabilidade Econômica
12	Sutentabilidade Econômica
13	Sutentabilidade Econômica

Fonte: Elaborado pela autora.

O gráfico apresentado na figura 16 demonstra a divisão percentual referente a motivação de implantação das tecnologias 4.0 pelas empresas.

Figura 16: Motivação para implantação das novas tecnologias.



Fonte: Elaborado pela autora.

No questionamento sobre quais eram os principais objetivos da empresa com a implantação foram obtidas as respostas descritas no quadro 9 a seguir. Este quadro também apresenta uma análise sobre qual pilar da sustentabilidade os objetivos declarados pelos respondentes se enquadram.

Quadro 9: Objetivos da implantação.

Empresa	Objetivos da implantação	Sustentabilidade		
		Econômica	Ambiental	Social
1	A Indústria 4.0 traz benefícios financeiros de economia de bilhões de Reais, e em um mundo competitivo é importante entender como as novas tecnologias podem trazer impactos positivos nos resultados da empresa.	✓		
2	Otimização de consumos e redução de falhas.	✓	✓	
3	Ser uma empresa mais sustentável.	✓	✓	✓
4	Resultados.			
5	Eliminar papel, aumentar a qualidade e produtividade.	✓	✓	
6	Melhoria de eficiência na produção.	✓	✓	
7	Qualidade e custo.	✓		
8	Inovação e produtividade.	✓	✓	
9	Reduzir o tempo de tomada de ação em problemas industriais.	✓	✓	
10	Aumento da eficiência da companhia com um todo.	✓	✓	

11	Aumento de eficiência ou produtividade; redução de custos de produção; redução de riscos à saúde ou segurança do trabalho.	✓	✓	✓
12	Elevar os patamares de segurança e produtividade dos processos industriais.	✓	✓	✓
13	Aumento de eficiência operacional e melhoria de níveis de qualidade, predição e prescrição de falhas de equipamentos e processos.	✓	✓	

Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com o quadro, podemos ver que na grande maioria dos casos a motivação das empresas para a adoção das tecnologias 4.0, quando nos referimos a sustentabilidade, estão alinhadas com seus objetivos e mesmo que não seja declarada como maior motivação, a sustentabilidade ambiental também está inserida nos objetivos. A empresa “1” foca claramente na sustentabilidade econômica, visando benefícios financeiros. Já a empresa “2” visa a redução de consumo e falhas, esses objetivos podem ser associados tanto a sustentabilidade econômica quanto a ambiental, pois teremos a redução no consumo de recursos matérias-primas, inclusive os provenientes da redução de falhas na produção, beneficiando o meio ambiente, acarretando numa redução de custos se enquadrando também no viés econômico. A empresa “3” declara querer se tornar uma empresa mais sustentável, o que engloba os três pilares da sustentabilidade. A resposta da empresa “4” foi considerada inconclusiva. A empresa”5” cita a eliminação de papel além do aumento de produtividade, considerando que uma maior produtividade envolve economia de tempo e recursos, podemos considerar que os dois objetivos declarados estão englobados na sustentabilidade ambiental e econômica, empresa “6” se enquadra nesta mesma questão. Já a empresa “7” cita apenas a questão do custo e da qualidade, logo foi classificada com foi classificada como sustentabilidade econômica. A empresa “8” conforma as demais que citaram produtividade, foi enquadrada em econômica e ambiental. Reduzir a tomada de ação em problemas industriais, citada pela empresa “9” também foi aditada como econômica e ambiental, tendo em vista que a solução rápida de problemas na produção industrial evita desperdícios acarretando benefícios financeiros e ambientais. Dentro de um conceito de eficiência onde se espera um maior rendimento, minimizando erros e desperdícios, o objetivo da empresa “10” se une aos demais que englobam sustentabilidade econômica e ambiental. As empresas “11” e “12” foram enquadradas nos três pilares da sustentabilidade por citar as melhorias na produtividade, além de citar questões como segurança e saúde do trabalhador. O quadro é finalizado pela empresa “13” que por também citar a correção de falhas que

geram benefícios ambientais e financeiros se encaixou na sustentabilidade ambiental e econômica.

3.2.4 Resultados obtidos pelas empresas com a implantação das tecnologias 4.0.

Para entender quais foram os resultados obtidos pela implantação das tecnologias 4.0, foi primordial a identificação de quais tecnologias foram adotadas por cada empresas. O quadro 10, traz esta identificação. Pode-se observar que as empresas “6” e “12” se destacam pelo maior número de tecnologias utilizadas, totalizando oito tecnologias. Contrastando com essas empresas temos as empresas “4” com apenas 1 tecnologia e as empresas “3”, “5” e “7”. Com apenas duas.

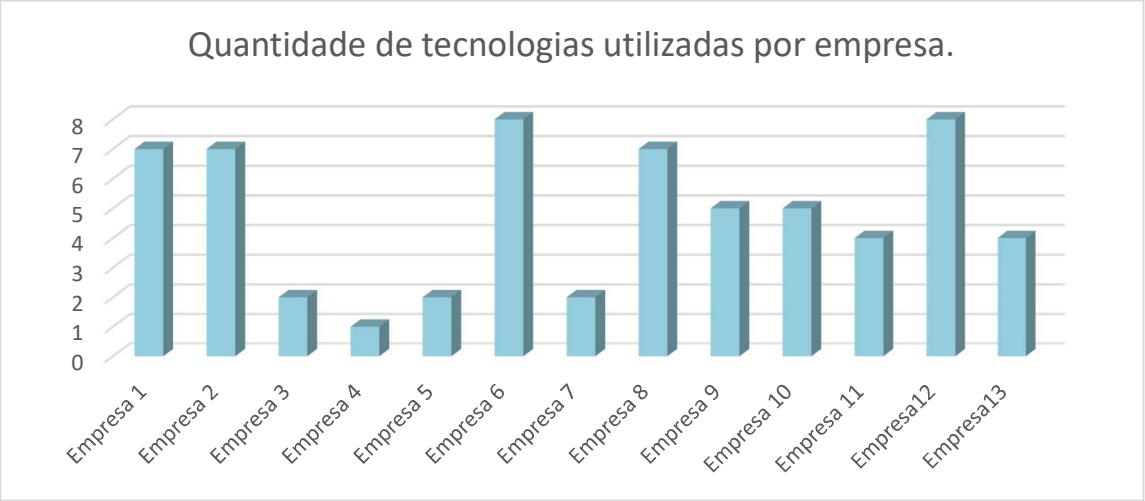
Quadro10: Tecnologias utilizadas pelas empresas entrevistadas.

Tecnologias	Empresas												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Internet das coisas (IoT)													
Big Data													
Cibersegurança													
Robôs Autônomos													
Realidade Aumentada													
Simulação													
Impressão 3D													
Inteligência Artificial													

Fonte: Elaborado pela autora.

A seguir, na figura 17, temos a representação gráfica das tecnologias mais utilizadas pelas empresas entrevistadas.

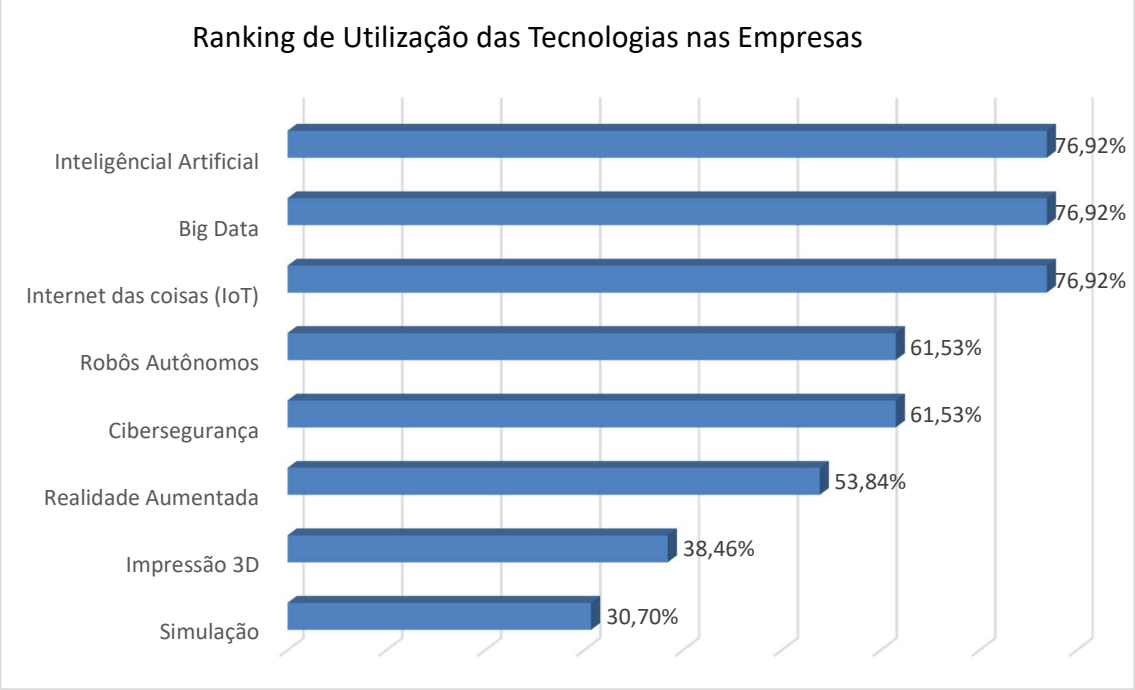
Figura 17: Quantidade de tecnologias utilizadas por empresa.



Fonte: Elaborado pela autora.

As tecnologias que mais se destacaram por estarem presentes na maioria das empresas entrevistadas foram as Internet das coisas, Big Data e inteligência Artificial, com um alcance de aproximadamente 77%. Em seguida temos cibersegurança e robôs autônomos com cerca de 62% de alcance, realidade aumentada próximo de 54%, finalizando com impressão 3D com pouco mais de 38% e simulação fechando o ranking com apenas aproximadamente 31% de alcance, conforme a representação gráfica presente na figura 18.

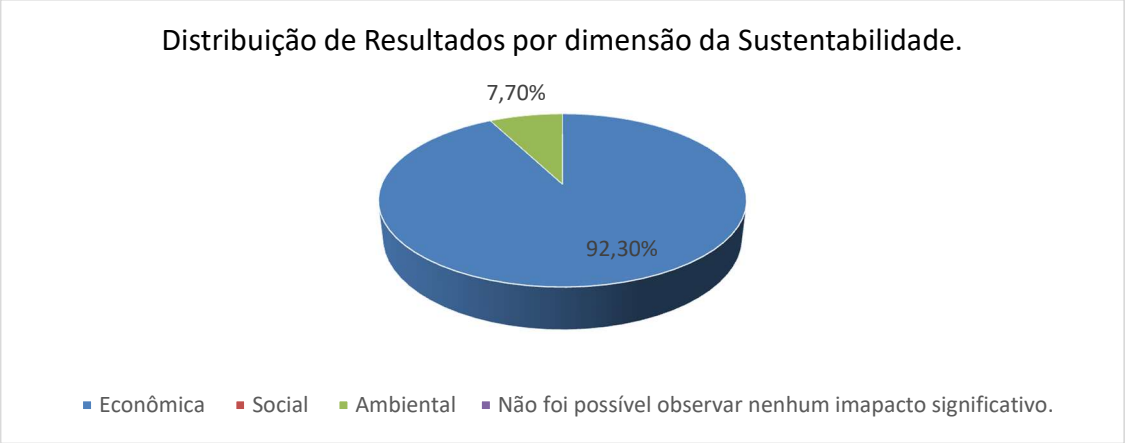
Figura 18: Ranking de utilização das tecnologias.



Fonte: Elaborado pela autora.

As empresas foram perguntadas sobre em qual dimensão da sustentabilidade foi possível observar os melhores resultados e a resposta dominante foi que a sustentabilidade econômica sobressaiu, conforme a distribuição percentual está representada abaixo na figura 19:

Figura 19: Distribuição de resultados por dimensão da sustentabilidade.

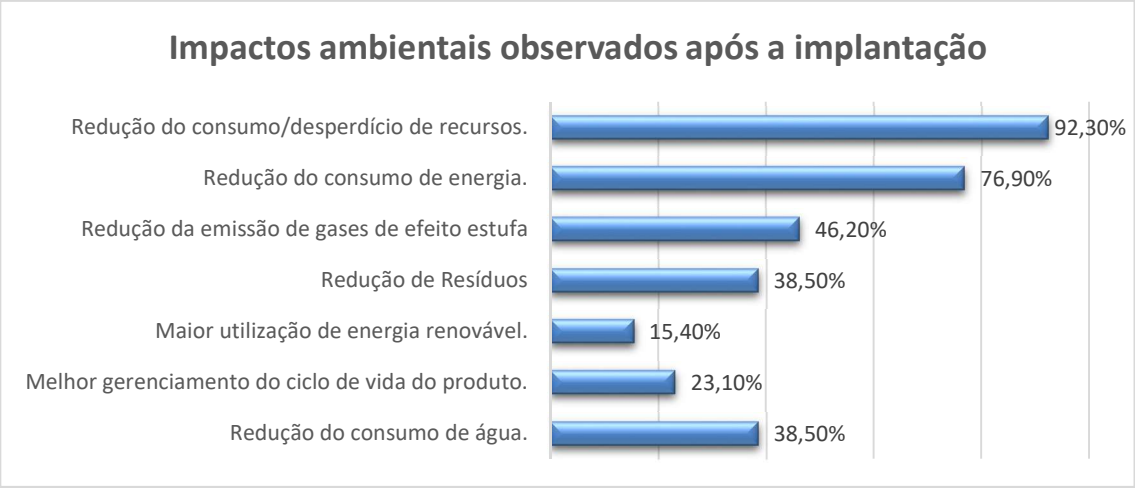


Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.4.1 Resultados Referentes a Sustentabilidade Ambiental.

Os entrevistados foram questionados sobre quais impactos ambientais, identificados no presente estudo (Quadro5), como os principais impactos relacionados a indústria 4.0, puderam ser observados após a implantação das novas tecnologias em sua empresa. A partir das respostas foi criado o gráfico da figura 20. Cabe salientar que o respondente “Empresa 5” inseriu o impacto “Agilidade na gestão” dentro da opção “outros” do questionário. Porém, a mesma foi preterida por não ser considerada um impacto ambiental. As demais opções alcançaram a seguinte distribuição:

Figura 20: Impactos ambientais observados após a implantação

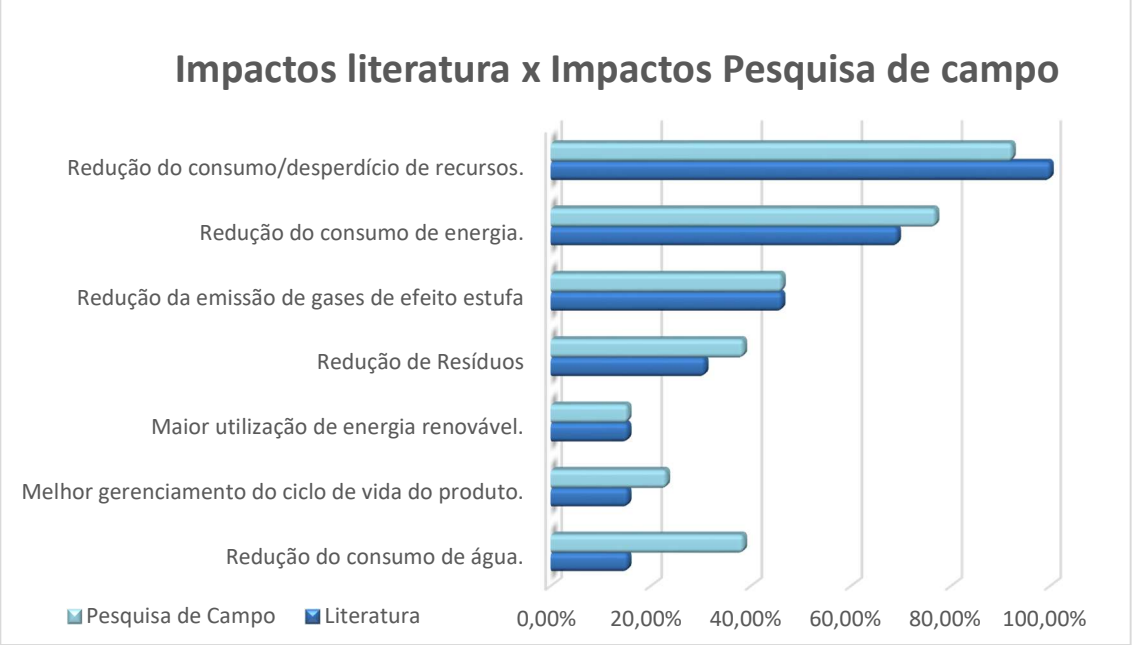


Fonte: Elaborado pela autora.

É possível observar que a redução de consumo ou desperdícios de recursos foi percebida por praticamente todas as empresas, exceto por uma delas, alcançando o percentual de 92,30% das empresas entrevistadas. Outro impacto que também teve grande destaque foi a redução do consumo de energia, constatada por aproximadamente 77% dos participantes. A redução da emissão de gases de efeito estufa pôde ser observada por quase metade dos participantes. A redução do consumo de água e de resíduos alcançaram o mesmo percentual, 38,50% seguidos melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto com 23,10% e da maior utilização de energia renovável com 15,40% dos participantes.

Com base nos impactos levantados na literatura presentes no quadro 5 e na reposta dos participantes(figura 20), foi criado um gráfico comparativo (figura 21), onde podemos observar que os resultados alcançados pelas empresas entrevistadas se aproximam muito dos resultados esperados, mantendo a “Redução do consumo/desperdício de recursos”, a “Redução do consumo de energia” e “ Redução da emissão de efeito estufa” em destaque, tanto no que era esperado, quanto no que de fato ocorreu nas empresas após a implantação das novas tecnologias. Já com relação a “Redução no consumo de água”, houve uma variação, tendo este impacto assumido um papel mais relevante nos resultados alcançados pelas empresas participantes do que nos resultados que eram esperados.

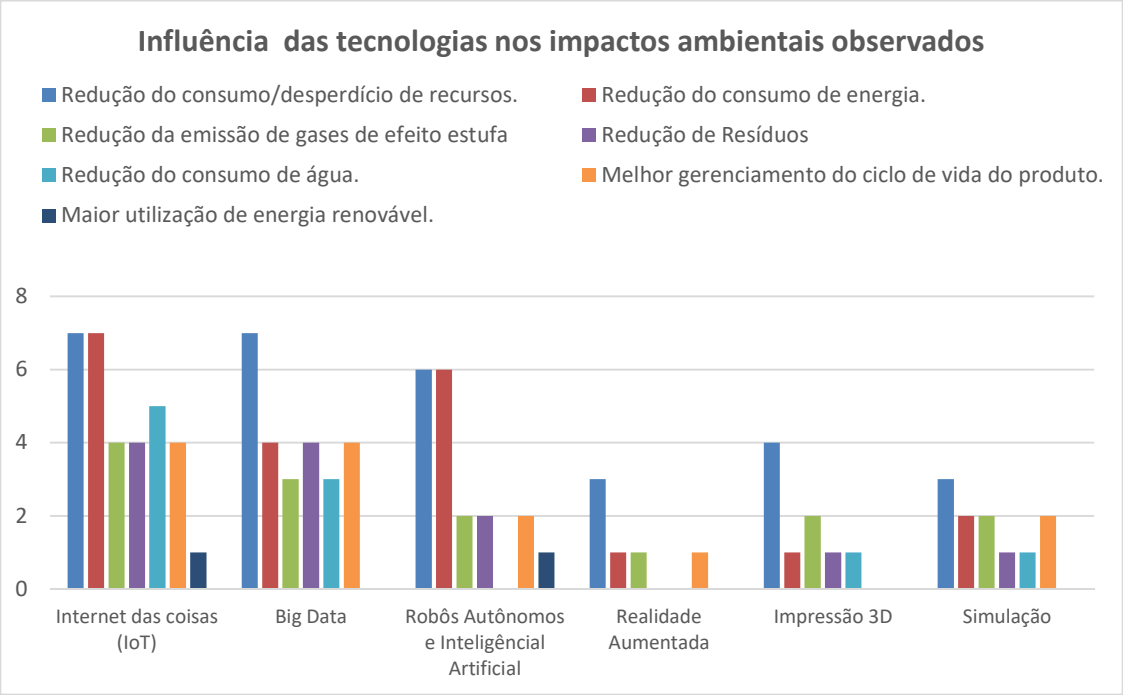
Figura 21: Comparação entre os impactos esperados e os impactos confirmados.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para entender a influência que cada tecnologia exerce nos resultados encontrados, foi solicitado aos participantes que indicassem quais das tecnologias foram utilizadas para o alcance de cada impacto observado. Os resultados foram explicitados através dos gráficos presentes na figura22:

Figura 22: Influência das tecnologias nos impactos ambientais observados.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os gráficos mostram que a internet das coisas teve influência em todos os impactos ambientais observados pelas empresas, tendo sua maior intervenção na redução do consumo e desperdício de recursos e a redução do consumo de energia. Big data, robôs autônomos e inteligência artificial, também demonstraram influenciar em grande parte dos impactos verificados. No caso do big data a maior influência recai sobre redução do consumo e desperdício de recursos, assim como no caso dos robôs autônomos e inteligência artificial, porém neste segundo caso a maior influência é dividida com a redução do consumo de energia. A realidade aumentada também teve declarada sua maior influência sobre a redução do consumo e desperdício de recursos, assim como nos casos da impressão 3D e simulação.

Para finalizar a entrevista, os participantes foram questionados sobre quais fatores foram considerados como fundamentais para o alcance dos resultados e também sobre quais fatores foram considerados como barreiras.

Os fatores citados como fundamentais para o alcance dos resultados foram analisados e classificados dentro das categorias abaixo, as respostas na íntegra podem ser consultadas no Anexo III.

- Monitoramento de dados: Trata-se da utilização dos dados monitorados para a otimização dos processos e auxílio na tomada de decisão tanto operacional quanto gerencial.
- Pessoas: Esta categoria trata do engajamento e adesão dos colaboradores na implantação da indústria 4.0.
- Custos: Diz respeito ao conhecimento dos custos de investimentos e dos benefícios financeiros que podem ser obtidos como retorno.
- Capacitação: Neste caso são englobados a capacitação dos profissionais que irão lidar diretamente com as tecnologias bem como os profissionais que farão a análise desses dados para a tomada de decisão.

A seguir na figura 23, temos representada a distribuição da frequência em que os fatores englobados em cada categoria foram citados. Tendo como destaque o monitoramento de dados. As demais categorias tiveram a mesma representatividade.

Figura 23:Fatores fundamentais para os resultados.



Fonte: Elaborado pela autora.

As barreiras citadas foram classificadas dentro das categorias a seguir, as respostas na íntegra podem ser consultadas no Anexo III:

- Falta de conhecimento da empresa: Diz respeito a falta de preparo da empresa com relação aos conhecimentos sobre a indústria 4.0, no nível estratégico, seja sobre as tecnologias envolvidas ou sobre os resultados que podem ser alcançados através da utilização das mesmas.
- Inviabilidade econômica: Engloba questões como o alto custo do investimento em novas tecnologias e na implantação de projetos.
- Infraestrutura: Trata-se das dificuldades na adaptação da infraestrutura atual das empresas para a realidade exigida pela indústria 4.0.
- Falta de mão de obra capacitada: Falta de pessoal qualificado para lidar com as novas tecnologias.
- Pessoas: Esta categoria engloba as questões relacionadas a dificuldade de implantação devido a resistência a mudança por questões pessoais dos colaboradores.

Na figura 24 a seguir temos a representação gráfica da distribuição da frequência em que as barreiras enquadradas em cada categoria foram citadas. Pode-se observar que a

categoria “pessoas” foi a categoria que englobou a maior parte das barreiras citadas, seguida por” falta de conhecimento da empresa”. As demais categorias alcançaram o mesmo nível de citações.

Figura 24: Distribuição das barreiras citadas por categorias.



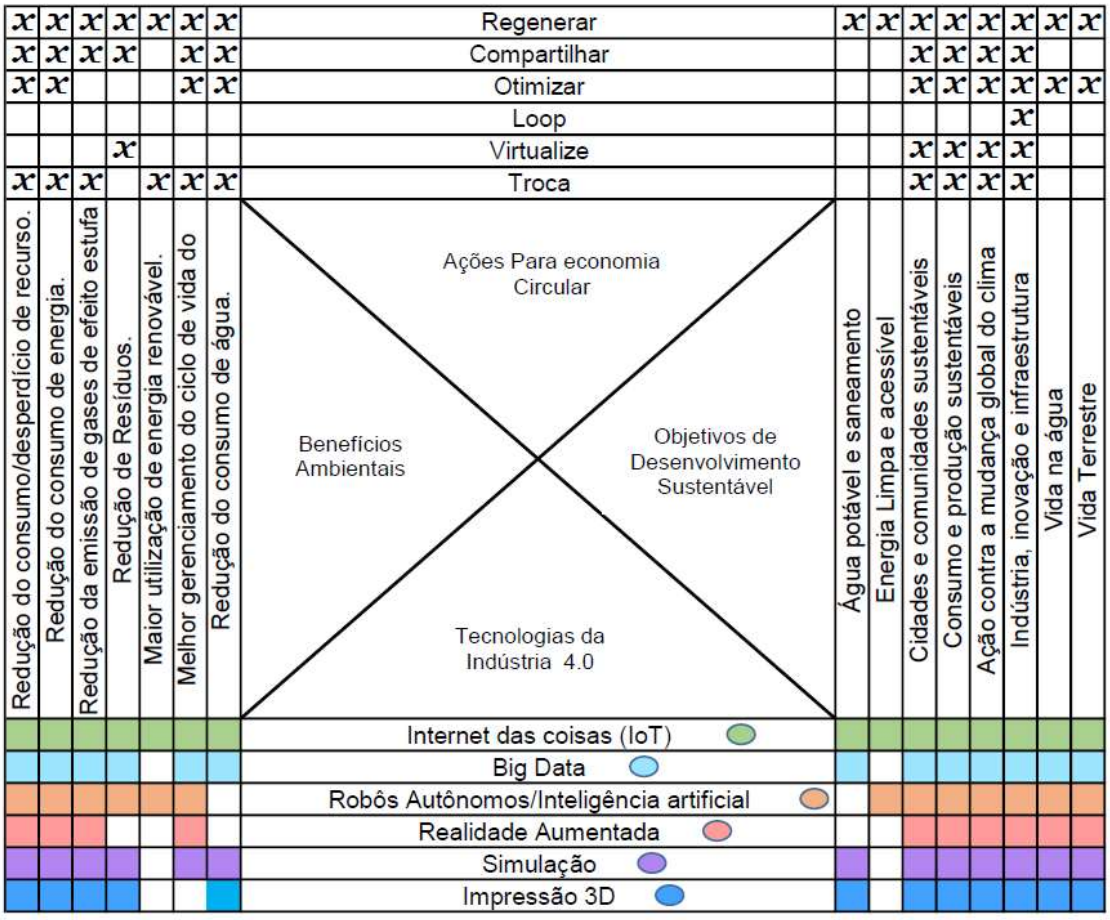
Fonte: Elaborado pela autora.

3.3 – Matriz de Relacionamento entre os ODS da ONU, indústria 4.0 e economia circular.

Para que fosse possível uma maior visibilidade das relações entre as tecnologias da indústria 4.0, os benefícios ambientais que podem ser acarretados pela utilização das mesmas, as ações para economia circular e os objetivos de desenvolvimento sustentável, foi elaborada a Matriz “X” ilustrada na figura 25. Para a esquematização da matriz, no campo “Tecnologias da indústria 4.0” foram utilizadas as tecnologias mais citadas na fase de revisão sistemática de literatura, que também foram utilizadas nos questionários da pesquisa de campo. A revisão sistemática ainda gerou como resultado os benefícios utilizados no campo “Benefícios ambientais”. As ações elencadas no campo “Ações para economia circular” são as ações propostas pela Ellen MacArthur Foundation através do framework REsolve e por fim, no campo “Objetivos de desenvolvimento sustentável”, foram utilizados os ODS da ONU, que possuem relação com as questões relacionadas a sustentabilidade ambiental e a indústria.

As relações “Tecnologias da indústria 4.0” x “Benefícios ambientais” se deram através das respostas dos entrevistados que indicaram quais tecnologias influenciaram em cada resultado, conforme o exposto na figura 22. As relações “Benefícios ambientais” x “Ações para a economia circular” e ”Ações para economia circular” x “ Objetivos de desenvolvimento sustentável” foram traçadas à partir de uma análise, que utilizou a revisão de literatura presente neste estudo como base. Já a relação “Objetivos de desenvolvimento sustentável” x “Tecnologias da indústria 4.0” foi obtida través da análise do cruzamento das demais relações.

Figura 25: Matriz “X”.



Fonte: Elaborado pela autora.

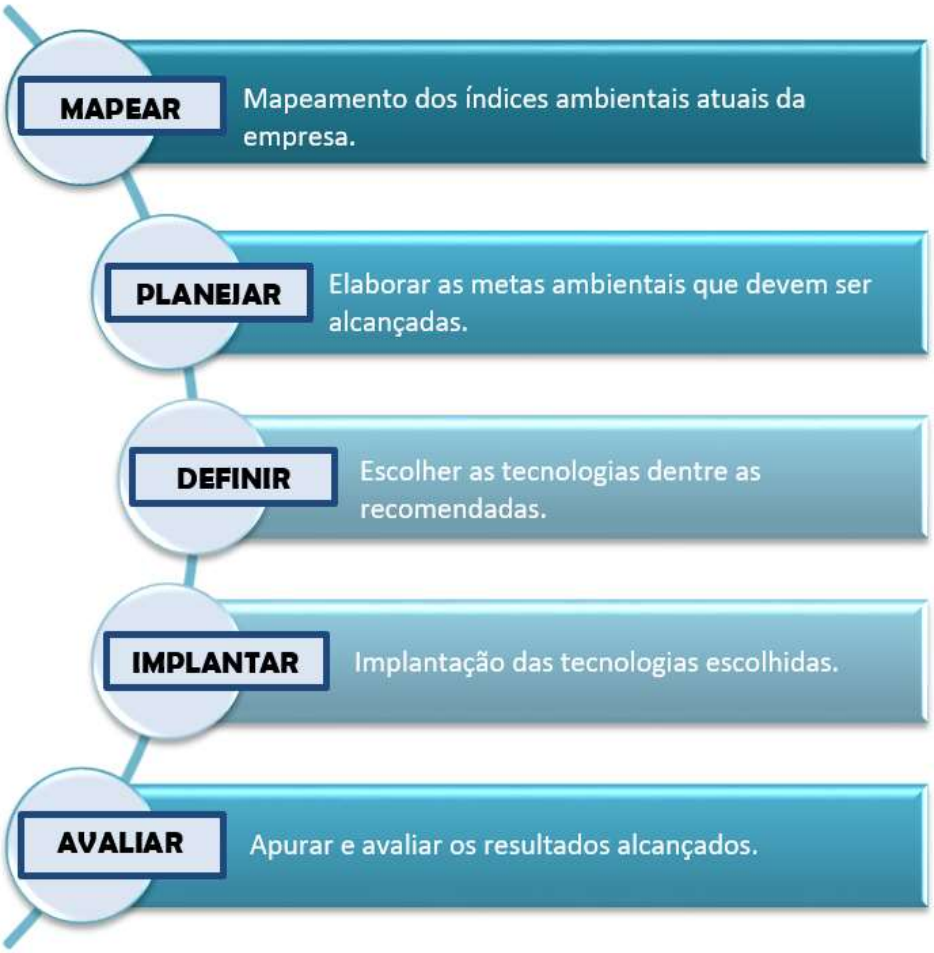
Na matriz é possível observar a relação que cada tecnologia tem com os benefícios ambientais e como esse benefício irá se conectar com as ações para economia circular, que por sua vez colaboram para o alcance de um objetivo de desenvolvimento

sustentável e também como cada tecnologia se relaciona diretamente com um objetivo. Por exemplo, podemos notar que a internet das coisas está ligada a ação regenerar que por sua vez está ligada a vários objetivos, estabelecendo também relações diretas com todos os ODS presentes na matriz.

3.4 Framework 4.0/2030

Após análise dos demais resultados, foi elaborado o Framework 4.0/2030 presente na figura 26. Esta estrutura tem como principal objetivo orientar os interessados em implantar as tecnologias 4.0, sobre qual a tecnologia é a mais indicada para alcançar suas metas referentes a sustentabilidade ambiental, podendo desta forma contribuir para alcance dos ODS.

Figura 26: Framework 4.0/2030.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os índices ambientais que são indicados para o mapeamento, assim como as metas e tecnologias, são baseadas nos resultados da pesquisa de campo presente nesta dissertação.

- Mapear: Para o mapeamento dos índices ambientais atuais, são sugeridos os tópicos presentes no quadro 11.

Quadro 11: Índices Ambientais.

Índices Ambientais
Consumo de recursos (matérias-primas em geral).
Consumo de Energia.
Emissão de gases de efeito estufa.
Geração de Resíduos.
Utilização de Energia Renovável.
Consumo de Água.

Fonte: Elaborado pela autora.

- Planejar: Com base no resultado da fase de mapeamento a organização deve traçar suas metas e objetivos considerando os efeitos esperados como consequência da implantação das novas tecnologias para alcançar melhores resultados nos índices que não apresentam um desempenho satisfatório. As metas devem estar inseridas no contexto das sugestões presentes no quadro 12.

Quadro 12: Metas sugeridas.

Metas Sugeridas
Redução do consumo/desperdício de recurso.
Redução do consumo de energia.
Redução da emissão de gases de efeito estufa.
Redução de Resíduos.

Maior utilização de energia renovável.
Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto.
Redução do consumo de água.

Fonte: Elaborado pela autora.

- Definir: Após o planejamento das metas a serem atingidas deve-se utilizar quadro 13 Abaixo para identificar e definir qual a tecnologia é a mais indicada para o alcance dos objetivos traçados. O quadro indica quais tecnologias são indicadas para o alcance de cada objetivo, numa escala de prioridade onde "1" indica a tecnologia mais indicada, "2" a segunda e assim sucessivamente. Esta escala foi montada com base nos resultados dos entrevistados.

Quadro 13: Quadro de escolha de tecnologias.

	Internet das coisas (IoT)	**Big Data**	**Robôs Autônomos e Inteligência Artificial**	**Realidade Aumentada**	**Impressão 3D**	**Simulação**
Redução do consumo/desperdício de recursos.	**1**	**1**	**2**	**4**	**3**	**4**
Redução do consumo de energia.	**1**	**3**	**2**	**5**	**4**	**4**
Redução da emissão de gases de efeito estufa	**1**	**2**	**3**	**4**	**3**	**3**
Redução de Resíduos	**1**	**1**	**2**	**-**	**3**	**3**
Redução do consumo de água.	**1**	**2**	**-**	**-**	**3**	**3**
Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto.	**1**	**1**	**2**	**3**	**-**	**2**
Maior utilização de energia renovável.	**1**	**-**	**1**	**-**	**-**	**-**

Fonte: Elaborado pela autora.

- Implantar: Esta fase trata-se do momento da implantação das tecnologias que

foram escolhidas.

- Avaliar: Após a implantação e funcionamento das novas tecnologias é sugerido que se faça uma reavaliação dos índices escolhidos, para que se possa avaliar quais foram os resultados pós-implantação.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.

Neste capítulo serão discutidos os resultados referentes a cada fase desta dissertação, bem como cada um deles levou ao atingimento dos objetivos propostos inicialmente para esta pesquisa.

Revisão Sistemática

Durante a realização da revisão sistemática, foram encontrados muitos estudos que relacionam o tema indústria 4.0 à sustentabilidade, um total de 2534 estudos, porém após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão para chegar aos trabalhos que de fato seriam relevantes para esta pesquisa e trouxessem resultados referentes a sustentabilidade ambiental, este número caiu drasticamente apenas 13 estudos foram incluídos após análise final.

Através da revisão sistemática, foi possível evidenciar quais os impactos relacionados a sustentabilidade ambiental são esperados ou já foram relatados pela literatura previamente existente. A maioria dos impactos identificados se refere aos impactos esperados, tendo em vista a escassez de estudos de caso e exemplos empíricos que relacionem a indústria 4.0 com a sustentabilidade ambiental, conforme foi sugerido anteriormente e ratificado por diversos autores em seus estudos, como Margherita e Braccini (2020), Bonilla *et al*. (2018), Kamble *et al.* (2018) e Oluyisola *et a*l. (2020). Esta fase foi de grande importância, pois além de seus resultados terem sido utilizados como alicerce para a construção do questionário para a pesquisa de campo, também foram usufruídos como parâmetro de comparação, frente aos resultados relatados pelos entrevistados, esta comparação será exposta na próxima seção, onde discutiremos os resultados da pesquisa de campo.

Pesquisa de Campo.

Apesar do questionário de pesquisa ter sido enviado para um número expressivo

de possíveis participantes, totalizando um grupo de 500 pessoas, o alcance real, considerando o número de respostas devolvidas, foi de 13 participantes. Apesar de não ser um número elevado, o número de participantes foi considerado válido para a continuidade da pesquisa, tendo em vista a dificuldade de acesso a respondentes considerados aptos a responderem o questionário, pois os mesmos, deveriam ter acesso a informações gerenciais, que em muitos casos precisam de autorização da empresa para serem divulgadas, alguns participantes entraram em contato relatando a impossibilidade de participar por estes motivos.

O grupo entrevistado ofereceu uma distribuição bem diversificada no que diz respeito ao setor industrial a que pertencem, indicando que os resultados podem ser alcançados independente do setor industrial pertencente. A maioria das empresas já passou pela implantação num período superior a três anos, o que já permite uma avaliação mais consistente dos resultados pela própria empresa.

Conforme o esperado e ratificado por Saytro *et al*.(2022) em seu estudo que conclui que em geral a primeira motivação para a implantação da indústria 4.0 está mais voltada para questões ligadas a produtividade e competitividade, a maioria das empresas entrevistadas declararam a sustentabilidade econômica como maior motivação para a implantação das novas tecnologias, porém mesmo que não fosse o foco, quando mencionaram seus principais objetivos, os mesmos, se enquadravam tanto na sustentabilidade econômica, quanto na sustentabilidade ambiental, conforme o exposto no Quadro 9. Esta visão por parte das empresas precisa ser trabalhada no sentido de que como Garcia-Muiña et al. (2020) expõe em seu estudo, o vínculo entra a indústria 4.0 e a sustentabilidade deve ser pensado dentro de um modelo estratégico de negócios, que não se limite apenas a fatores econômicos e envolva também as questões sociais e ambientais se alinhando ao Triple Bottom Line. A sustentabilidade, se devidamente introduzida e comunicada, pode alterar a proposta de valor e causar a diferenciação de um produto diante da concorrência (GARCÍA-MUIÑA *et al.*, 2020).

Boa parte das empresas participantes utilizam uma faixa de pelo menos 50% das tecnologias apresentadas na pesquisa, porém três tecnologias indicadas merecem destaque por serem utilizadas em quase todas as entrevistadas, são elas; internet das coisas, big data e inteligência artificial. Quando perguntados sobre em qual dimensão da sustentabilidade foi possível observar os melhores resultados, as respostas foram de encontro à principal motivação declarada pelos entrevistados, a dimensão econômica.

Ainda que as empresas destaquem como prioridade e como receptora dos melhores resultados a dimensão econômica, todas os respondentes foram capazes de

indicar resultados ligados a sustentabilidade ambiental, ratificando a possibilidade de que a implantação das tecnologias 4.0 podem sim amenizar danos ambientais, que estão em ampla discussão por demandarem soluções urgentes, assim como afirma Moktadir *et al.* (2018) quando destaca que a manufatura inteligente e a tecnologia limpa são capazes de ajudar as empresas a reduzir o desperdícios e impactos ambientais negativos, ou Morrar *et al.* (2017) quando ressalta que a indústria 4.0 pode reduzir as limitações ecológicas relacionadas a práticas industriais tradicionais e colaborar intensamente com o desenvolvimento sustentável.

O impacto que teve mais destaque foi a “Redução do consumo /desperdício de recursos”, seguido por “Redução do consumo de energia” e “Redução da emissão de gases de efeito estufa”. Esta informação vai de encontro as informações levantadas na revisão sistemática, que conforme o gráfico comparativo presente na figura 21, traz estes mesmos impactos como os mais esperados. Com exceção da “Redução do consumo de água” e “Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto”, que apresentam uma maior variação entre os resultados da pesquisa de campo e os levantados na literatura, sendo mais observado na pesquisa de campo. Todos os outros impactos seguem os resultados esperados pela literatura existente, havendo, portanto, uma confirmação desses benefícios. A internet das coisas se destacou como a tecnologia que influencia em todos os impactos observados, porém todas as tecnologias tiveram influência em mais de 50% nos resultados ambientais observados.

Os entrevistados foram consultados sobre os fatores fundamentais para que os resultados ambientais fossem alcançados, por ser uma questão aberta, para um melhor entendimento, as repostas foram classificadas em categorias, conforme a figura 23. Diante das respostas apresentadas, podemos entender que o monitoramento de dados, categoria que englobou a maior parte das respostas nos resultados obtidos a teve maior influência para o alcance dos resultados, ressaltando mais uma vez o papel da internet das coisas na implantação, porém as demais categorias, que são, “capacitação dos profissionais”, “cálculo de custo” e pessoas, também tiveram grande importância na conquista dos resultados, tendo em vista que a distribuição das respostas dentre as categorias foi bem aproximada. Com relação a capacitação dos profissionais, este é um ponto crucial e merece bastante atenção, pois foi citado tanto como fator fundamental quanto como barreira. Segundo Figueiredo e Graglia (2021), uma nova política industrial e tecnológica que contemple também o incentivo a formação de mão de obra aderente as questões da indústria 4.0, se faz necessária para inserção do Brasil na Quarta revolução industrial

Além de fatores fundamentais, as principais barreiras para o alcance dos resultados também foram consultadas e da mesma forma, foram classificadas em categorias (figura24) que são, “falta de conhecimento da empresa”, “inviabilidade econômica”, “infraestrutura”, “falta de mão de obra capacitada” e “Pessoas”. No caso das barreiras, o fator “pessoas”, se apresentou como a maior dificuldade para o alcance dos resultados, explicitando uma atenção especial à necessidade de adoção de práticas que sejam capazes de interferir na resistência a mudança dentro das organizações. Outra questão de maior relevância diz respeito a “falta de conhecimento da empresa”, salientando que a disseminação das informações sobre a implantação das novas tecnologias e da adoção do conceito da indústria 4.0, assim como seus objetivos e possíveis resultados, se faz necessária em todos os níveis da empresa. As questões sobre “infraestrutura” e “inviabilidade econômica”, requerem um planejamento e estudo para que se possa viabilizar a implantação. Figueiredo e Graglia (2021) reiteram que, para aumentar o protagonismo da indústria brasileira, se faz necessário o fortalecimento de parcerias público-privadas para assim garantir bases de financiamento que garantam a retomada da industrialização. Ainda afirmam que diante do déficit histórico apresentado pela infraestrutura física do Brasil, o país precisa aumentar os investimentos em infraestrutura física e digital. A falta de mão de obra capacitada, diz respeito não somente ao treinamento que pode ser oferecido pela empresa, mas também a capacitação realizada fora da empresa, como cursos técnicos, de graduação ou especialização. Profissionais ligados à área industrial devem investir na sua formação e atualização para acompanhar esta nova demanda do mercado.

Matriz de Relacionamento entre os ODS da ONU, indústria 4.0, economia circular.

A matriz “X” de relacionamento entre os ODS da ONU, indústria 4.0, economia circular, tem como objetivo explicitar as relações entre essas variáveis, através dos benefícios ambientais. Basicamente é possível observar como uma tecnologia 4.0 influencia, num determinado benefício ambiental, que está ligado a uma ação para a economia circular e como esta ação está relacionada ao alcance de um ODS. Além da relação direta entre uma tecnologia e os ODS.

A matriz elaborada neste estudo tem a capacidade de evidenciar como a implantação das tecnologias 4.0 estão intimamente ligadas a sustentabilidade ambiental, trazendo benefícios ambientais e fomentando práticas voltadas para a economia circular, além de contribuir diretamente para o alcance dos ODS da ONU, assim como

Schroeder *et al.* (2018) afirmar em seu estudo, destacando como benefícios das práticas circulares a redução de emissões de gases de efeito estufa, redução de resíduos, do consumo de materiais, poupança energética e a utilização de energias renováveis. Garcia-Muiña *et al*. (2020) também reiteram que a implementação da indústria 4.0 está relacionada a redução de resíduos, a diminuição do consumo de recursos e requisitos de energia e no aumento das práticas de economia circular.

Framework 4.0/2030.

O Framework 4.0/2030 foi criado a partir dos demais resultados alcançados nesta dissertação. As experiências das empresas entrevistadas foram utilizadas como base para o desenvolvimento desta estrutura que tem como objetivo principal, oferecer aos interessados a implantar as tecnologias 4.0, almejando a alavancagem de seus resultados ambientais, uma ferramenta de apoio. Esta ferramenta, possibilita a escolha das tecnologias mais indicadas para atender a demanda de cada empresa de acordo com os objetivos ambientais traçados. Espera-se que ao seguir os passos deste framework as organizações possam alcançar resultados semelhantes aos conquistados pelas empresas participantes, aumentando seus níveis referentes a sustentabilidade ambiental e contribuindo para o alcance dos ODS.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.

A presente dissertação tinha como propósito fornecer um panorama das oportunidades associadas à sustentabilidade ambiental trazidas pela implantação das tecnologias englobadas pelo conceito de indústria 4.0, através da experiência das empresas que já passaram por esta implantação no Brasil e explorar como tais oportunidades podem impulsionar o alcance dos ODS da ONU, para o cumprimento da Agenda 2030.

Para alcançar tal objetivo, inicialmente foi realizada uma revisão sistemática de literatura, que possibilitou o mapeamento de quais impactos ambientais estão relacionados e são esperados pela implantação das tecnologias 4.0. Os principais impactos encontrados foram, a redução do consumo e do desperdício de recurso, a redução do consumo de energia, a redução da emissão de gases de efeito estufa, a redução de resíduos, a maior utilização de energia renovável, o melhor gerenciamento

do ciclo de vida do produto e a redução do consumo de água.

Após esta fase, foi realizada a pesquisa de campo com empresas localizadas no Brasil que já passaram por esta implantação. Através desta pesquisa de campo, foi possível confirmar que os impactos levantados na literatura existente são compatíveis com os resultados obtidos pelas empresas que participaram desta pesquisa, ratificando a contribuição das tecnologias 4.0 para o alcance dos benefícios ambientais relatados anteriormente. Através da pesquisa de campo também foi possível entender quais tecnologias estão conectadas ao alcance de cada benefício citado.

Através da elaboração da Matriz “X” de relacionamento, entre a indústria 4.0, a economia circular e os ODS, foi possível visualizar, como a indústria 4.0 pode contribuir para o alcance dos ODS da ONU sob a ótica da economia circular. Esta contribuição se dá por meio da utilização das tecnologias 4.0 como incremento das práticas circulares envolvidas nas Ações para economia circular promovidas pela Ellen MacArthur Foundation através do framework ReSOLVE. A demonstração dessas relações através da matriz apresentada, se torna mais uma forma de legitimar a contribuição da indústria 4.0 em práticas sustentáveis que fomentam o alcance dos ODS.

Através destas informações foi possibilitada a criação do Framework 4.0/2030. A estrutura de trabalho apresentada nesta dissertação, sintetiza a partir da experiência das empresas que já passaram pela implantação do conceito de indústria 4.0, orientações para os novos interessados em adotar as novas tecnologias almejando a oportunidade de avançar com relação a sustentabilidade ambiental de sua empresa. Considera-se interessante, em paralelo ao framework, observar tanto os fatores indicados como fundamentais, quanto as principais barreiras indicadas pelos entrevistados, a fim de facilitar a implantação e maximizar as chances de chegar aos resultados esperados.

Este estudo contribui com uma nova visão de como diversas tecnologias abarcadas pelo conceito de indústria 4.0 podem contribuir para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, incluindo a oportunidade da aplicação das tecnologias em práticas relacionadas a economia circular. O estudo oferece novas perspectivas a partir da ótica da sustentabilidade ambiental, para o cumprimento das metas estabelecidas para a Agenda 2030.

Esta pesquisa apresenta limitações com relação ao número de participantes. O objetivo de alcançar respondentes que tenham acesso ao tipo de informação demandada por essa pesquisa, que em sua maioria pertencem ao alto escalão das empresas, se torna uma tarefa de grande complexidade. Além do difícil acesso aos respondentes, muitos respondentes convidados a participar sofreram uma restrição por parte da empresa em

divulgar os dados, mesmo de forma que o nome da empresa participante fosse preservado. Outro ponto levantado como possível fator de impacto no número de participantes é que como a maioria das empresas, não faz a implantação visando as oportunidades ambientais, muitas vezes os dados ligados a sustentabilidade ambiental não são consolidados, impedindo a participação dos convidados. No entanto, mesmo diante destas dificuldades, o número de respondentes foi considerado válido para a continuidade do estudo, estabelecendo importantes ligações entre a teoria levantada e a pesquisa prática, ampliando assim o conhecimento existente sobre a relação entre indústria 4.0 e a sustentabilidade ambiental, para que os possíveis stakeholders possam apoiar suas decisões.

Esta dissertação oferece como grande contribuição, diante da escassez de exemplos empíricos, o conhecimento sobre casos concretos de resultados relacionados a sustentabilidade ambiental, ocasionados pela implantação de tecnologias 4.0. Além do Framework 4.0/2030, que visa orientar os possíveis interessados sobre como alcançar resultados ambientais aplicando o conceito de indústria 4.0, contribuindo assim para a sustentabilidade ambiental e para o cumprimento das metas para a Agenda 2030.

Sugere-se para pesquisas futuras a validação do framework 4.0/2030. Apesar da pesquisa ter sido realizada com empresas localizadas no Brasil, isso não limita aplicação do framework em outras regiões.

Referências

ACERBI, Federica; TAISCH, Marco. A literature review on circular economy adoption in the manufacturing sector. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 273, p. 123086, nov. 2020. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123086.

AHMAD, Sumera *et al*. Towards Sustainable Textile and Apparel Industry: exploring the role of business intelligence systems in the era of industry 4.0. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 7, p. 2632, 26 mar. 2020. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/su12072632.

AKBARI, Mohammadreza; HOPKINS, John L. Digital technologies as enablers of supply chain sustainability in an emerging economy. **Operations Management Research**, [S.L.], v. 15, n. 3-4, p. 689-710, 11 maio 2022. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s12063-021-00226-8

AKKAD, Mohammad Zaher *et al*. Investigation of the Industry 4.0 Technologies Adoption Effect on Circular Economy. **Sustainability**, [S.L.], v. 14, n. 19, p. 12815, 8 out. 2022. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/su141912815.

BAI, Chunguang et al. Industry 4.0 technologies assessment: a sustainability perspective. **International Journal Of Production Economics**, [S.L.], v. 229, p. 107776-107776, nov. 2020. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776.

BIRKEL, Hendrik; VEILE, Johannes; MÜLLER, Julian; HARTMANN, Evi; VOIGT, Kai-Ingo. Development of a Risk Framework for Industry 4.0 in the Context of Sustainability for Established Manufacturers. **Sustainability**, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 384, 14 jan. 2019. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/su11020384.

BOCKEN, N.M.P.; RANA, P.; SHORT, S.W.. Value mapping for sustainable business thinking. **Journal Of Industrial And Production Engineering**, [S.L.], v. 32, n. 1, p. 67-81, 2 jan. 2015. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1080/21681015.2014.1000399.

BONILLA, Silvia; SILVA, Helton; SILVA, Marcia Terra da; GONÇALVES, Rodrigo Franco; SACOMANO, José. Industry 4.0 and Sustainability Implications: a scenario-based analysis of the impacts and challenges. **Sustainability**, [S.L.], v. 10, n. 10, p. 3740-3740, 17 out. 2018. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/su10103740.

BRACCINI, Alessio; MARGHERITA, Emanuele. Exploring Organizational Sustainability of Industry 4.0 under the Triple Bottom Line: the case of a manufacturing company. **Sustainability**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 36-36, 21 dez. 2018. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/su11010036.

BROZZI, Riccardo; FORTI, David; RAUCH, Erwin; MATT, Dominik T.. The Advantages of Industry 4.0 Applications for Sustainability: results from a sample of manufacturing companies. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 9, p. 3647-3647, 1 maio 2020. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/su12093647.

CLARKE, Roger. Big data, big risk. **Information Systems Journal**, [*s. l*], v. 26, n. 1, p. 77-90, dez. 2015. doi: 10.1111 / isj.12088 .

Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED). Nosso futuro comum ; Oxford University Press: Oxford, Reino Unido, 1987. [Google Scholar]

CULOT, Giovanna *et al*. Addressing Industry 4.0 Cybersecurity Challenges. **Ieee Engineering Management Review**, [*s. l*], v. 47, n. 3, p. 79-86, 09 jul. 2019

ELKINGTON, J. (1997). Canibais com garfos: o triplo resultado dos negócios do século 21 Mankato, MN: Capstone.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, SUN, McKinsey & Co. June 2015. Growth Within: a circular economy vision for a competitive Europe. [Online] Available at: (2017, http://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications).

FELSBERGER, Andreas *et al*. The impact of Industry 4.0 on the reconciliation of dynamic capabilities: evidence from the european manufacturing industries. **Production Planning & Control**, [S.L.], v. 33, n. 2-3, p. 277-300, 4 set. 2020. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1080/09537287.2020.1810765.

FIGUEIREDO, Américo Rodrigues de; GRAGLIA, Marcelo Augusto Vieira. INDUSTRY 4.0 IN BRAZIL AND THE CHALLENGES OF THE PRODUCTIVITY OF THE ECONOMY. **Journal On Innovation And Sustainability Risus**, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 13-28, 23 dez. 2021. Pontifical Catholic University of Sao Paulo (PUC-SP). http://dx.doi.org/10.23925/2179-3565.2021v12i4p13-28.

FRITZSCHE, Kerstin *et al*. Industry 4.0 and Climate Change—Exploring the Science-Policy Gap. **Sustainability**, [S.L.], v. 10, n. 12, p. 4511, 30 nov. 2018. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/su10124511.

GALEGALE, Gustavo Perri *et al*. THE INTERNET OF THINGS APPLIED TO BUSINESS: A BIBLIOMETRIC STUDY. **Jistem - Journal Of Information Systems And Technology Management**: Revista de Gestão da Tecnologia e Sistemas de Informação, São Paulo, v. 13, n. 3, p. 423-438, set. 2016.

GALVÃO, Tais Freire *et al*. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. **Epidemiol. Serv. Saúde**, Brasília, v. 1, n. 23, p. 183-184,Jan. 2014.

GARCÍA-MUIÑA, Fernando E. *et al*. Sustainability Transition in Industry 4.0 and Smart Manufacturing with the Triple-Layered Business Model Canvas. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 6, p. 2364, 18 mar. 2020. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/su12062364.

GERMANO, Aline Xavier dos Santos *et al*. Contribuição das tecnologias da indústria 4.0 para a sustentabilidade: uma revisão sistemática. **Palabra Clave (La Plata)**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 142, 1 out. 2021. Universidad Nacional de La Plata. http://dx.doi.org/10.24215/18539912e142.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetas de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002, p 57.

GODOY,Arilda Schmidt. Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. **RAE - Revista de Administração de Empresas**, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 57-63, 1995.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. 2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS). Anais IEEE, 2016

HUGHES, Laurie *et al*. Perspectives on the future of manufacturing within the Industry 4.0 era. **Production Planning & Control**, [S.L.], v. 33, n. 2-3, p. 138-158, 30 ago. 2020. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1080/09537287.2020.1810762.

IVASCU, Larisa. Measuring the Implications of Sustainable Manufacturing in the Context of Industry 4.0. **Processes**, [S.L.], v. 8, n. 5, p. 585-585, 14 maio 2020. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/pr8050585.

JABBOUR, Ana Beatriz Lopes de Sousa *et al*. Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. **Annals Of Operations Research**, [S.L.], v. 270, n. 1-2, p. 273-286, 1 fev. 2018. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s10479-018-2772-8.

JUNIOR, W. T. L. (2012). Big Data, Jornalismo Computacional e Data Journalism: estrutura, pensamento e prática profissional na Web de dados. Universidade Federal de São Paulo. Estudos em comunicação n° 12, p.207-222.

JUNG, C. F. Metodologia Científica - Ênfase em Pesquisa Tecnológica. 4ª Edição, 2004.

KAMBLE, Sachin S. *et al*. Sustainable Industry 4.0 framework: a systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. **Process Safety And Environmental Protection**, [S.L.], v. 117, p. 408-425, jul. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009.

KHAN, Syed Abdul Rehman *et al*. Technological Revolution and Circular Economy Practices: a mechanism of green economy. **Sustainability**, [S.L.], v. 14, n. 8, p. 4524, 11 abr. 2022. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/su14084524.

KLAUS, Schwab. **A QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL**. São Paulo: Edipro, 2016. 159 p. TRADUÇÃO DANIEL MOREIRA MIRANDA.

KORHONEN, Jouni *et al*. Circular Economy: the concept and its limitations. **Ecological Economics**, [S.L.], v. 143, p. 37-46, jan. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041.

LEWANDOWSKI, M., 2016. Desenhando os Modelos de Negócios para a Economia Circular-Rumo Estrutura Conceitual. *Sustentabilidade,* 8(1), 43.

MACARTHUR, de, & waughray, d. (2016). Ativos inteligentes. Desbloqueando o potencial da economia circular. Relatório da Fundação Ellen MacArthur.

MAIA, Andrei Giovani *et al*. Uma compreensão da sustentabilidade por meio dos níveis de complexidade das decisões organizacionais. **Ram. Revista de Administração** http://dx.doi.org/10.1590/s1678-69712011000300008.

MARGHERITA, Emanuele Gabriel *et al*. Organizational Impacts on Sustainability of Industry 4.0: a systematic literature review from empirical case studies. **Digital Business**

Transformation, [S.L.], p. 173-186, 2020. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-47355-6_12.

MOKTADIR, Md. Abdul *et al*. Assessing challenges for implementing Industry 4.0: implications for process safety and environmental protection. **Process Safety And Environmental Protection**, [S.L.], v. 117, p. 730-741, jul. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2018.04.020.

MORRAR, Rabeh; ARMAN, Husam. The Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0): a social innovation perspective. **Technology Innovation Management Review**, [S.L.], v. 7, n. 11, p. 12-20, 27 nov. 2017. Carleton University. http://dx.doi.org/10.22215/timreview/1117.

MOURA, Luciano Raizer *et al*. Maturity Assessment in Industry 4.0 – A Comparative Analysis of Brazilian and German Companies. **Emerging Science Journal**, [S.L.], v. 4, n. 5, p. 365-375, 1 out. 2020. Ital Publication. http://dx.doi.org/10.28991/esj-2020-01237.

MÜLLER, Julian M. *et al*. Sustainable Industrial Value Creation in SMEs: a comparison between industry 4.0 and made in china 2025. **International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing-Green Technology**, [S.L.], v. 5, n. 5, p. 659-670, out. 2018. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s40684-018-0056-z.

MÜLLER, Julian Marius *et al*. What Drives the Implementation of Industry 4.0? The Role of Opportunities and Challenges in the Context of Sustainability. **Sustainability**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 247, 18 jan. 2018. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/su10010247.

NOVIKOV, Sergey V. *et al*. Production's digital transformation analysis using Industry 4.0 technologies. **Revista Amazonia Investiga**, [S.L.], v. 9, n. 27, p. 234-243, 21 mar. 2020. Amazonia Investiga. http://dx.doi.org/10.34069/ai/2020.27.03.25.

OKORIE, Okechukwu *et al*. Digitisation and the Circular Economy: a review of current research and future trends. **Energies**, [S.L.], v. 11, n. 11, p. 3009, 1 nov. 2018. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/en11113009.

OLUYISOLA, Olumide Emmanuel; SGARBOSSA, Fabio; STRANDHAGEN, Jan Ola. Smart Production Planning and Control: concept, use-cases and sustainability implications. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 9, p. 3791-3791, 7 maio 2020. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/su12093791.

ORGANIZATION, World Intellectual Property. Índice Global de Inovação. **Índice Global de Inovação: Resumo Executivo.**, [S.L.], p. 1-28, 2022. Unknown. http://dx.doi.org/10.34667/TIND.46620. Disponível em: https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/pt/wipo-pub-2000-2022-exec-pt-global-innovation-index-2022-15th-edition.pdf. Acesso em: 20 dez. 2022.

PEDERCINI, Matteo *et al*. Integrated simulation for the 2030 agenda †. **System Dynamics Review**, [S.L.], v. 36, n. 3, p. 333-357, jul. 2020. Wiley. http://dx.doi.org/10.1002/sdr.1665.

PEREIRA, Raquel. O sistema de Economia Circular e a Agenda 2030: análise da evolução em portugal. **E3**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 097-124, 31 jul. 2021. **Ponteditora.**

http://dx.doi.org/10.29073/e3.v7i1.381.

SARTAL, Antonio *et al*. The sustainable manufacturing concept, evolution and opportunities within Industry 4.0: a literature review. **Advances In Mechanical Engineering**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 168781402092523, maio 2020. SAGE Publications. http://dx.doi.org/10.1177/1687814020925232.

SATYRO, Walter Cardoso *et al*. Industry 4.0 implementation: the relevance of sustainability and the potential social impact in a developing country. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 337, p. 130456, fev. 2022. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130456.

SCHWAB, Klaus; DAVIS, Nicholas. **Aplicando a quarta revolução industrial**. São Paulo: Edipro, 2018. 350 p.

SCHWAB, K.; MACKENZIE, U. **A quarta revolução industrial**. 1o Ed ed. Geneva: 2016, 2016.

SCHROEDER, Patrick *et al*. The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. **Journal Of Industrial Ecology**, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 77-95, 13 fev. 2018. Wiley. http://dx.doi.org/10.1111/jiec.12732.
SORIANO, J. et al. Internet of services. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), v. 7768 LNCS, p. 283–325, 2013.

STOCK, T.; SELIGER, G.. Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. **Procedia Cirp**, [S.L.], v. 40, p. 536-541, 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129

SU, Biwei *et al*. A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 42, p. 215-227, mar. 2013. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.020.

VARELA, Leonilde *et al*. Evaluation of the Relation between Lean Manufacturing, Industry 4.0, and Sustainability. **Sustainability**, [S.L.], v. 11, n. 5, p. 1439, 8 mar. 2019. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/su11051439.

VILES, Elisabeth *et al*. Theorizing the Principles of Sustainable Production in the context of Circular Economy and Industry 4.0. **Sustainable Production And Consumption**, [S.L.], v. 33, p. 1043-1058, set. 2022. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.spc.2022.08.024.

WAIBEL, M.W. *et al*. Investigating the Effects of Smart Production Systems on Sustainability Elements. **Procedia Manufacturing**, [S.L.], v. 8, p. 731-737, 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.094.

Referências Eletrônicas

CNI - Confederação Nacional da Indústria. **A difusão das tecnologias da indústria 4.0 em empresas brasileiras** ,2020. Disponível em:

https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2020/9/difusao-das-tecnologias-da-industria-40-em-empresas-brasileiras/
Acesso em: 15/01/2021

CNI – Confederação Nacional da Indústria. Sistema da Indústria – Portal da Indústria. Brasília, DF. Disponível em:http://www.portaldaindustria.com.br/cni/institucional/sistema-industria/Acesso em: 20 dez. 2022.

EMF - Ellen MacArthur Foundation -**Introdução à economia circular**: O que é uma economia circular? 2022. Disponível em: https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview. Acesso em: 18 nov. 2022.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Caderno sobre Ações de Eficiência Energética em Indústrias Brasileiras**. 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/caderno-sobre-acoes-de-eficiencia-energetica-em-industrias-brasileiras#:~:text=A%20ind%C3%BAstria%20brasileira%20responde%20por,os%20requisitos%20do%20sistema%20el%C3%A9trico.. Acesso em: 02 jan. 2023

IDEIA CIRCULAR. Economia Linear (org.). **O que é economia circular**. 2022. Disponível em: https://www.ideiacircular.com/economia-circular/. Acesso em: 18 nov. 2022.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL (org.). **Como as Nações Unidas apoiam os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**: os objetivos de desenvolvimento sustentável no brasil. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. 2022. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 22 dez. 2022.

PINHEIRO, Davi Teixeira. **Revoluções Industriais**. 2021. Disponível em: https://www.linkedin.com/pulse/revolu%C3%A7%C3%B5es-industriais-davi-teixeira-pinheiro/?originalSubdomain=pt%2004/01/23%2014:02. Acesso em: 04 jan. 2023

ANEXO I – Questionário Piloto.

INDÚSTRIA 4.0: UM ESTUDO SOBRE IMPACTOS NA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL.

Este questionário faz parte de uma pesquisa realizada para a obtenção de grau de Mestre do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Sistemas produtivos do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET-RJ. O questionário destina-se a avaliar como a adoção das tecnologias referentes a Indústria 4.0 estão impactando na sustentabilidade ambiental das indústrias.

*Obrigatório

1. Nome da empresa. *

2. A empresa pertence a qual setor industrial? *

3. Cargo Ocupado pelo entrevistado. *

4. Autorização para divulgação dos dados: *

Marcar apenas uma oval.

- ◯ Autorizo que o nome da empresa, bem como todos os dados fornecidos neste questionário sejam divulgados na pesquisa citada acima.
- ◯ Não autorizo a utilização do nome da empresa na pesquisa, sendo a autora responsável pela elaboração de um nome fictício para divulgação dos dados fornecidos neste questionário.

5. A quanto tempo a empresa começou a utilizar as tecnologias referentes a Indústria 4.0. *

Marcar apenas uma oval.

- ◯ Há menos de 1 ano.
- ◯ De 1 a 3 anos.
- ◯ De 3 a 6 anos.
- ◯ De 6 a 10 anos.
- ◯ Há mais de 10 anos.

6. Qual foi a maior motivação da empresa para iniciar a implantação das tecnologias referentes a indústria 4.0? *

Marcar apenas uma oval.

- ◯ Sustentabilidade Econômica.
- ◯ Sustentabilidade Social.
- ◯ Sustentabilidade Ambiental.

7. Quais eram os principais objetivos com a implantação? *

8. Quais das tecnologias abaixo estão sendo utilizadas pela empresa? *

Marque todas que se aplicam.

- [ ] Internet das coisas (IoT).
- [ ] Big Data.
- [ ] Cibersegurança.
- [ ] Robôs Autônomos
- [ ] Realidade Aumentada.
- [ ] Simulação.
- [ ] Impressão 3D.
- [ ] Inteligência artificial

9. Após a implantação das novas tecnologias, em qual dimensão da sustentabilidade foi possível observar um melhor resultado? *

Marcar apenas uma oval.

- ◯ Econômica.
- ◯ Social.
- ◯ Ambiental.
- ◯ Não foi possível observar nenhum impacto significativo com relação a sustentabilidade na empresa.

10. Assinale os impactos ambientais que puderam ser observados após a implantação das tecnologias 4.0 em sua empresa. *

Marque todas que se aplicam.

- [ ] Redução do consumo/desperdício de recursos.
- [ ] Redução do consumo de energia.
- [ ] Redução da emissão de gases de efeito estufa.
- [ ] Redução de Resíduos.
- [ ] Maior utilização de energia renovável.
- [ ] Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto.
- [ ] Redução do consumo de água.
- [ ] Nenhum foi possível observar nenhum impacto ambiental.
- [ ] Outro: _____

11. Relacione os impactos citados anteriormente com as tecnologias utilizadas pela empresa.

Marque todas que se aplicam.

	Redução do consumo/desperdício de recursos.	Redução do consumo de energia.	Redução da emissão de gases de efeito estufa.	Redução de Resíduos.	Maior utilização de energia renovável.	M gerenc do c vic pro
Internet das coisas (IoT).	☐	☐	☐	☐	☐	
Big Data.	☐	☐	☐	☐	☐	
Robôs Autônomos e Inteligência artificial	☐	☐	☐	☐	☐	
Realidade Aumentada.	☐	☐	☐	☐	☐	
Simulação.	☐	☐	☐	☐	☐	
Impressão 3D.	☐	☐	☐	☐	☐	
Outras Tecnologias	☐	☐	☐	☐	☐	

12. Quais fatores a empresa considera que foram fundamentais para que os resultados referentes a sustentabilidade ambiental fossem alcançados? *

13. Quais fatores a empresa considera que foram uma barreira para o alcance desses resultados? *

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários

ANEXO II – Questionário final

INDÚSTRIA 4.0: UM ESTUDO SOBRE OS IMPACTOS NA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DAS INDÚSTRIAS.

Este questionário faz parte de uma pesquisa realizada para a obtenção de grau de Mestre do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Sistemas produtivos do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET-RJ. O questionário destina-se a avaliar como a adoção das tecnologias referentes a Indústria 4.0 estão impactando na sustentabilidade ambiental das indústrias.

*Obrigatório

1. A empresa pertence a qual setor industrial? *

2. Cargo Ocupado pelo entrevistado. *

3. A quanto tempo a empresa começou a utilizar as tecnologias referentes a Indústria 4.0. *

Marcar apenas uma oval.

- ◯ Há menos de 1 ano.
- ◯ De 1 a 3 anos.
- ◯ De 3 a 6 anos.
- ◯ De 6 a 10 anos.
- ◯ Há mais de 10 anos.

4. Qual foi a maior motivação da empresa para iniciar a implantação das tecnologias referentes a indústria 4.0? *

Marcar apenas uma oval.

- ◯ Sustentabilidade Econômica.
- ◯ Sustentabilidade Social.
- ◯ Sustentabilidade Ambiental.

5. Quais eram os principais objetivos com a implantação? *

6. Quais das tecnologias abaixo estão sendo utilizadas pela empresa? *

Marque todas que se aplicam.

- [ ] Internet das coisas (IoT).
- [ ] Big Data.
- [ ] Cibersegurança.
- [ ] Robôs Autônomos
- [ ] Realidade Aumentada.
- [ ] Simulação.
- [ ] Impressão 3D.
- [ ] Inteligência artificial

7. Após a implantação das novas tecnologias, em qual dimensão da sustentabilidade foi possível observar um melhor resultado? *

Marcar apenas uma oval.

- ◯ Econômica.
- ◯ Social.
- ◯ Ambiental.
- ◯ Não foi possível observar nenhum impacto significativo com relação a sustentabilidade na empresa.

8. Assinale os impactos ambientais que puderam ser observados após a implantação das tecnologias 4.0 em sua empresa. *

Marque todas que se aplicam.

- [ ] Redução do consumo/desperdício de recursos.
- [ ] Redução do consumo de energia.
- [ ] Redução da emissão de gases de efeito estufa.
- [ ] Redução de Resíduos.
- [ ] Maior utilização de energia renovável.
- [ ] Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto.
- [ ] Redução do consumo de água.
- [ ] Nenhum foi possível observar nenhum impacto ambiental.
- [ ] Outro: _____

9. Relacione os impactos citados anteriormente com as tecnologias utilizadas pela empresa.

Marque todas que se aplicam.

	Redução do consumo/desperdício de recursos.	Redução do consumo de energia.	Redução da emissão de gases de efeito estufa.	Redução de Resíduos.	Maior utilização de energia renovável.	Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto.	Redução do consumo de água.	Nenhum foi possível observar nenhum impacto ambiental.
Internet das coisas (IoT).	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Big Data.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Robôs Autônomos e Inteligência artificial	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Realidade Aumentada.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Simulação.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Impressão 3D.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Outras Tecnologias	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

10. Quais fatores a empresa considera que foram fundamentais para que os resultados referentes a sustentabilidade ambiental fossem alcançados? *

11. Quais fatores a empresa considera que foram uma barreira para o alcance desses resultados? *

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários

ANEXO III – Respostas dos Questionários.

Empresa	A empresa pertence a qual setor industrial?	Cargo Ocupado pelo entrevistado.
1	Cosméticos	Plant Manager
2	Papel & Celulose	Supervisor de Automação
3	Farmacêutico	Supervisor de manutenção industrial
4	Alimentos	Analista de sistemas para indústria 4.0
5	Software	Engenheiro de software
6	Automotivo	Assessor CEO
7	Envase	Tecnico
8	Construção	Gerente
9	Construção Civil	Coordenador de Projetos
10	Construção Civil	Tecnico em Elétrica
11	Serviços em Tecnologia da Informação	Gerente Sênior
12	Resposta ocultada por identificar o respondente	Gerente geral de Indústria 4.0
13	Construção e reformas	Coordenador Corporativo Indústria 4.0
Empresa	**Há quanto tempo a empresa começou a utilizar as tecnologias referentes a Indústria 4.0.**	**Qual foi a maior motivação da empresa para iniciar a implantação das tecnologias referentes a indústria 4.0?**
1	De 3 a 6 anos.	Sustentabilidade Econômica.
2	Há mais de 10 anos.	Sustentabilidade Ambiental.
3	De 1 a 3 anos.	Sustentabilidade Ambiental.
4	De 1 a 3 anos.	Sustentabilidade Econômica.
5	De 3 a 6 anos.	Sustentabilidade Econômica.
6	De 3 a 6 anos.	Sustentabilidade Econômica.
7	De 1 a 3 anos.	Sustentabilidade Econômica.
8	De 3 a 6 anos.	Sustentabilidade Econômica.
9	De 3 a 6 anos.	Sustentabilidade Econômica.
10	De 1 a 3 anos.	Sustentabilidade Econômica.
11	De 3 a 6 anos.	Sustentabilidade Econômica.
12	De 6 a 10 anos.	Sustentabilidade Econômica.
13	De 1 a 3 anos.	Sustentabilidade Econômica.
Empresa	**Quais eram os principais objetivos com a implantação?**	**Quais das tecnologias abaixo estão sendo utilizadas pela empresa?**
1	A Indústria 4.0 traz benefícios financeiros de economia de bilhões de Reais, e em um mundo competitivo é importante entender como as novas tecnologias podem trazer impactos positivos nos resultados da empresa.	Internet das coisas (IoT)., Big Data., Robôs Autônomos, Realidade Aumentada., Simulação., Impressão 3D., Inteligência artificial
2	Otimização de consumos e redução de falhas	Internet das coisas (IoT)., Big Data., Cibersegurança., Robôs Autônomos, Realidade Aumentada., Simulação., Inteligência artificial
3	Ser uma empresa mais sustentável	Internet das coisas (IoT)., Cibersegurança.
4	Resultados	Robôs Autônomos
5	Eliminar papel, aumentar a qualidade e produtividade.	Big Data., Inteligência artificial
6	Melhoria de eficiência na produção.	Internet das coisas (IoT)., Big Data., Cibersegurança., Robôs Autônomos, Realidade Aumentada., Simulação., Impressão 3D., Inteligência artificial
7	Qualidade e custo	Realidade Aumentada., Impressão 3D.
8	Inovação e produtividade	Internet das coisas (IoT)., Big Data., Cibersegurança., Robôs Autônomos, Realidade Aumentada., Impressão 3D., Inteligência artificial

9	Reduzir o tempo de tomada de ação em problemas industriais	Internet das coisas (IoT)., Big Data., Cibersegurança., Realidade Aumentada., Inteligência artificial
10	Aumento da eficiencia da companhia com um todo	Internet das coisas (IoT)., Big Data., Cibersegurança., Robôs Autônomos, Inteligência artificial
11	Aumento de eficiência ou produtividade; redução de custos de produção; redução de riscos à saúde ou segurança do trabalho	Internet das coisas (IoT)., Big Data., Robôs Autônomos, Inteligência artificial
12	Elevar os patamares de segurança e produtividade dos processos industriais	Internet das coisas (IoT)., Big Data., Cibersegurança., Robôs Autônomos, Realidade Aumentada., Simulação., Impressão 3D., Inteligência artificial
13	Aumento de eficiência operacional e melhoria de niveis de qualidade, predição e prescrição de falhas de equipamentos e processos.	Internet das coisas (IoT)., Big Data., Cibersegurança., Inteligência artificial
Empresa	**Após a implantação das novas tecnologias, em qual dimensão da sustentabilidade foi possível observar um melhor resultado?**	**Assinale os impactos ambientais que puderam ser observados após a implantação das tecnologias 4.0 em sua empresa.**
1	Econômica.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Redução da emissão de gases de efeito estufa., Redução de Resíduos., Redução do consumo de água.
2	Econômica.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Redução da emissão de gases de efeito estufa., Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto., Redução do consumo de água.
3	Ambiental.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Redução de Resíduos.
4	Econômica.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia.
5	Econômica.	Agilidade e Gestão
6	Econômica.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Redução da emissão de gases de efeito estufa., Redução de Resíduos., Maior utilização de energia renovável., Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto., Redução do consumo de água.
7	Econômica.	Redução do consumo/desperdício de recursos.
8	Econômica.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Redução da emissão de gases de efeito estufa., Maior utilização de energia renovável., Redução do consumo de água.
9	Econômica.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Redução de Resíduos.

10	Econômica.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto., Redução do consumo de água.
11	Econômica.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia.
12	Econômica.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Redução da emissão de gases de efeito estufa.
13	Econômica.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução da emissão de gases de efeito estufa., Redução de Resíduos.
Empresa	**Relacione os impactos citados anteriormente com as tecnologias utilizadas pela empresa. [Internet das coisas (IoT).]**	**Relacione os impactos citados anteriormente com as tecnologias utilizadas pela empresa. [Big Data.]**
1	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Redução da emissão de gases de efeito estufa., Redução de Resíduos., Redução do consumo de água.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução da emissão de gases de efeito estufa., Redução de Resíduos., Redução do consumo de água.
2	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução de Resíduos., Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto., Redução do consumo de água.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução de Resíduos., Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto., Redução do consumo de água.
3	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia.	
4		
5		
6	Redução do consumo de energia., Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto., Redução do consumo de água.	Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto.
7		
8	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Redução da emissão de gases de efeito estufa., Maior utilização de energia renovável., Redução do consumo de água.	Nenhum foi possível observar nenhum impacto ambiental.
9	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Redução de Resíduos.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Redução de Resíduos.
10		Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia.
11	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia.
12	Redução da emissão de gases de efeito estufa., Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Redução da emissão de gases de efeito estufa., Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto.

13	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Redução da emissão de gases de efeito estufa., Redução de Resíduos., Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto., Redução do consumo de água.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução da emissão de gases de efeito estufa., Redução de Resíduos., Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto., Redução do consumo de água.
Empresa	**Relacione os impactos citados anteriormente com as tecnologias utilizadas pela empresa. [Robôs Autónomos e Inteligência artificial]**	**Relacione os impactos citados anteriormente com as tecnologias utilizadas pela empresa. [Realidade Aumentada.]**
1	Redução do consumo/desperdício de recursos.	Redução do consumo/desperdício de recursos.
2	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto.	
3		
4	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia.	
5		
6	Redução do consumo de energia.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Redução da emissão de gases de efeito estufa., Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto.
7	Redução de Resíduos.	
8	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Redução da emissão de gases de efeito estufa., Maior utilização de energia renovável.	Nenhum foi possível observar nenhum impacto ambiental.
9		Redução do consumo/desperdício de recursos.
10	Redução do consumo de energia.	
11	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia.	
12		
13	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução da emissão de gases de efeito estufa., Redução de Resíduos., Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto.	
Empresa	**Relacione os impactos citados anteriormente com as tecnologias utilizadas pela empresa. [Simulação.]**	**Relacione os impactos citados anteriormente com as tecnologias utilizadas pela empresa. [Impressão 3D.]**
1	Redução do consumo/desperdício de recursos.	Redução do consumo/desperdício de recursos.
2	Redução do consumo de água.	
3		
4		
5		
6	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Redução da emissão de gases de efeito estufa., Redução de Resíduos., Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Redução da emissão de gases de efeito estufa., Redução de Resíduos., Redução do consumo de água.

7		Redução do consumo/desperdício de recursos.
8	Nenhum foi possível observar nenhum impacto ambiental.	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução da emissão de gases de efeito estufa.
9		
10		
11		
12	Redução do consumo/desperdício de recursos., Redução do consumo de energia., Redução da emissão de gases de efeito estufa., Melhor gerenciamento do ciclo de vida do produto.	
13		
Empresa	**Relacione os impactos citados anteriormente com as tecnologias utilizadas pela empresa. [Outras Tecnologias]**	**Quais fatores a empresa considera que foram fundamentais para que os resultados referentes a sustentabilidade ambiental fossem alcançados?**
1		Quando é intensificada a utilização de IoT e assim o monitoramento de indicadores ambientais é possível ter a visibilidade do que está acontecendo no "chão de fábrica" e consequentemente fazer a gestão e a melhoria contínua desses indicadores.
2		A otimização de controle de processo aumentou a eficácia da produção do produto e com isso a redução do consumo de água veio em conjunto.
3		Redução de resíduos
4		Esta parte ainda não foi desenvolvida
5		Adesão dos profissionais.
6	Redução do consumo/desperdício de recursos.	Engajamento das pessoas.
7		Custo
8		Big little movies, atento ao mercado e tecnologias
9		Capacitação da equipe para uso das ferramentas da Indústria 4.0
10	Redução do consumo/desperdício de recursos.	Redução do Desperdício
11		Clareza sobre o problema de negócio que se pretendia resolver; revisão de processos produtivos ou de negócio, além da implantação de tecnologias da indústria 4.0
12		Política ESG estruturada, com metas bem definidas dentro da empresa e Inclusão do cálculo de CO na visão de benefício dos investimentos dentro do processo de detalhamento dos investimentos.
13		IoT e dados historeados para uso no dia-dia e capacitação na análise para tomada de decisão ágil.
Empresa	**Quais fatores a empresa considera que foram uma barreira para o alcance desses resultados?**	

1	Infraestrutura para a conectividade, capacitação dos colaboradores, falta de conhecimento de mercado e de soluções pelos fornecedores, paradigmas de mindset da liderança, orgulho e medo de perder o emprego.
2	Profissionais qualificados, e o convencimento que o resultado pode ser alcançado.
3	Desperdício
4	Conflito de Gerações. Treinamento e desenvolvimento pessoal.
5	Cultura apegada ao passado.
6	Escalar soluções por toda a organização que fizeram sucesso em ambientes menores, mais controlados (POCs).
7	Pessoas
8	Preços, oferta de produtos, pandemia
9	Viabilidade econômica em projetos ambientais
10	Provavelmente o fator humano
11	Imaturidade tecnológica da empresa para a adoção de tecnologias da indústria 4.0 (processos, competências); falta de infraestrutura de conectividade
12	Tecnologia (que gera impacto elevado nos resultados de sustentabilidade) ainda em estágio inicial e com custo elevado.
13	Definição das melhores soluções via Provas de Conceito com start-ups e/ou empresas consolidadas.